

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté des sciences appliquées  
Département de génie mécanique

**SIMULATION DYNAMIQUE DES ÉCHANGES THERMIQUES À  
L'INTÉRIEUR D'UNE SERRE**

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées  
Spécialité: génie mécanique

Patrick LEMAY

Sherbrooke (Québec), CANADA

mars 1996

## SOMMAIRE

L'industrie serricole québécoise a connu une forte expansion depuis le début des années quatre-vingts. L'amélioration des techniques de construction et d'isolation des serres, de même que l'automatisation des procédés de culture y sont pour beaucoup. Par contre, le climat plus froid du Québec demeure toujours un obstacle à la compétitivité de cette industrie face à celle des pays dont la température est plus clémente. Pour pallier à ce problème, certains stockent le surplus d'énergie solaire afin de le récupérer la nuit pour chauffer leur serre. Habituellement, ce stockage se fait dans des réservoirs d'eau répartis dans la serre ou dans des caissons remplis de pierres et enfouis sous le plancher. Ces façons de faire sont encombrantes et coûteuses. Cependant, une méthode simple mais moins connue, consiste à stocker le surplus de chaleur directement dans le sol en faisant circuler l'air chaud à travers des tuyaux qui y sont enfouis. C'est dans le but de mieux développer cette technique au Québec que le projet ÉCHAS (ÉCHangeur-Accumulateur de chaleur dans le Sol) a été lancé.

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, on se propose de modéliser et d'analyser le comportement thermique dynamique d'une serre commerciale propre au Québec. Cette étude porte particulièrement sur le comportement énergétique des plantes, la condensation sur les parois et sur le surplus de chaleur qu'une serre peut recueillir du soleil et stocker dans le sol. Les résultats de cette étude seront couplés à un second projet de recherche qui vise à concevoir de façon optimale un échangeur-accumulateur de chaleur dans le sol.

Les résultats de cette analyse montrent que l'évapotranspiration des plantes peut occasionner jusqu'à 48% des pertes énergétiques de la serre (début du printemps et fin de l'automne). De plus, le système ÉCHAS ne serait rentable que pour les plantes cultivées entre le début mars jusqu'à la fin septembre pour la région de Montréal et celle de La Pocatière. Dans le cas de Sept-Iles, la période efficace ne s'étendrait que de la mi-avril à la mi-septembre et avec des surplus de chaleur beaucoup plus faibles. Néanmoins, c'est dans ces périodes de l'année que l'on retrouve le plus grand nombre de producteurs actifs, de là, l'utilité du projet ÉCHAS.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement le professeur **Marcel Lacroix**, mon directeur de recherche, pour la confiance qu'il avait envers moi et sa patience jusqu'à la fin de cette maîtrise.

Je tiens également à remercier l'attaché de recherche **Carol Gauthier**, pour ses conseils tout au long de ce projet.

Je tiens à souligner ma reconnaissance envers **Hervé Bernier** et **Jean-Marc Boudreau** pour le partage de leurs connaissances dans le domaine des serres agricoles.

J'aimerais aussi exprimer ma gratitude à:

- ma famille pour leur soutien inestimable durant toutes mes études;
- mes collègues du groupe THERMAUS pour leur fraternité et leur aide technique;
- au Fonds FCAR pour la bourse dans la catégorie «Énergie» qu'ils m'ont octroyée;
- au Département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke pour leur aide financière au début de ma maîtrise et la bonne collaboration du personnel.

Enfin, je tiens à remercier le ministère des Ressources naturelles du Québec pour la subvention qui a permis la réalisation de ce projet et **Donald Maltais**, de ce même ministère, pour son enthousiasme et sa disponibilité pour ce projet.

## TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 <b>Problématique</b> .....	1
1.2 <b>Revue bibliographique</b> .....	4
1.2.1 <u>Bilan énergétique standard</u> .....	5
1.2.2 <u>Bilan énergétique «réactif»</u> .....	6
1.3 <b>Objectifs</b> .....	8
1.4 <b>Vue d'ensemble</b> .....	9
 2. CARACTÉRISTIQUES .....	 10
2.1 <b>Caractéristiques des serres commerciales</b> .....	10
2.1.1 <u>Géométrie</u> .....	10
2.1.2 <u>Orientation</u> .....	11
2.1.3 <u>Recouvrement</u> .....	11
2.1.4 <u>Isolation</u> .....	13
2.1.5 <u>Type de culture</u> .....	14
2.1.6 <u>Contrôle de l'environnement interne de la serre</u> .....	14
2.2 <b>Caractéristiques des sites de référence</b> .....	17
2.2.1 <u>Choix des sites</u> .....	17
2.2.2 <u>Génération des climats</u> .....	19
 3. MODÈLE.....	 22
3.1 <b>Hypothèses simplificatrices</b> .....	22
3.2 <b>Modélisation mathématique</b> .....	23
3.2.1 <u>Modélisation des pertes dans le sol</u> .....	28
3.2.2 <u>Modélisation du mur de plantes</u> .....	32
3.2.3 <u>Évapotranspiration</u> .....	34
3.2.4 <u>Condensation sur le fenêtrage interne de la serre</u> .....	37
3.2.5 <u>Éclairage et activité humaine</u> .....	40
3.2.6 <u>Transfert de chaleur et d'humidité entre les zones</u> .....	41
3.3 <b>Schéma d'une simulation dynamique dans TRNSYS</b> .....	46



4. VALIDATION.....	48
4.1 <b>Validation en régime permanent</b> .....	48
4.1.1 <u>Sans gains solaires, ni gains internes</u> .....	49
4.1.2 <u>Avec gains solaires, mais sans gains internes</u> .....	50
4.1.3 <u>Sans gains solaires, mais avec gains internes</u> .....	51
4.2 <b>Validation en régime transitoire</b> .....	52
4.2.1 <u>Évapotranspiration</u> .....	53
4.2.2 <u>Condensation</u> .....	55
4.2.3 <u>Stratification thermique entre les 2 zones</u> .....	55
4.2.4 <u>Bilan énergétique global</u> .....	56
5. ANALYSE PARAMÉTRIQUE.....	60
5.1 <b>Caractéristiques de la serre standard</b> .....	60
5.2 <b>Détermination des paramètres «énergivores»</b> .....	61
5.3 <b>Effets produits par la modification de paramètres</b> .....	63
5.3.1 <u>Modification de paramètres fixes</u> .....	64
5.3.2 <u>Modification des paramètres non fixes</u> .....	66
5.4 <b>Effet de la région choisie</b> .....	68
5.5 <b>Améliorations simples et peu coûteuses</b> .....	70
CONCLUSION.....	73
ANNEXES .....	77
Annexe A.....	78
Annexe B.....	79
Annexe C.....	82
BIBLIOGRAPHIE.....	101

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Principe du stockage de chaleur dans le sol.....	3
Figure 1.2	Relations entre les 2 sous-projets constituant ÉCHAS .....	4
Figure 2.1	Modèles de serre adaptés au climat québécois.....	11
Figure 2.2	Comparaison graphique des 3 climats d'étude.....	19
Figure 3.1	Surfaces constituant le rez-de-chaussée et l'entre-toit du modèle de la serre.....	24
Figure 3.2	Utilisation d'un mur pour modéliser les pertes dans le sol .....	29
Figure 3.3	Croissance d'un plant de tomates (hauteur à partir de la transplantation) .....	32
Figure 3.4	Échange thermique et massique entre les 2 zones.....	42
Figure 3.5	Organigramme d'une simulation .....	47
Figure 4.1	Écart sur $\dot{Q}_{\text{sens}}$ entre l'équation analytique et le modèle.....	50
Figure 4.2	Évapotranspiration de plants matures de tomates selon le rayonnement extérieur à la serre .....	53
Figure 4.3	Taux de condensation en fonction de l'humidité relative.....	55
Figure 4.4	Bilan de chauffage mensuel d'une serre .....	58

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	CARACTÉRISTIQUES DE DIFFÉRENTS RECOUVREMENTS TRANSPARENTS .....	12
TABLEAU 2.2	PARAMÈTRES OPTIMAUX DE CULTURE D'UN PLANT DE TOMATES (APRÈS LA TRANSPLANTATION) .....	17
TABLEAU 2.3	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES MENSUELLES MOYENNES DES 3 SITES DE L'ÉTUDE .....	18
TABLEAU 3.1	CONDUCTANCE MOYENNE DES FONDATIONS SELON LA TEMPÉRATURE DU SOL À LA POCATIÈRE.....	30
TABLEAU 3.2	COMPOSITION DU MUR QUI SIMULERA LES PERTES THERMIQUES PAR LE PLANCHER.....	31
TABLEAU 3.3	INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU MUR DE PLANTS DE TOMATES SUR LES ÉCHANGES RADIATIFS.....	33
TABLEAU 3.4	PROPRIÉTÉS OPTIQUES ET THERMIQUES DES RECOUVRE- MENTS DE SERRE AVEC OU SANS CONDENSATION.....	38
TABLEAU 5.1	DENSITÉ DE FEUILLAGE POUR DIVERSES CULTURES.....	67

## Nomenclature

### Alphabet

$A_i$	: Superficie du mur ou du fenêtrage <b>i</b> ( $m^2$ )
$A_{opaque}$	: Superficie de toutes les surfaces opaques à l'intérieur d'une zone ( $m^2$ )
$A_{total}$	: Superficie totale de toutes les surfaces à l'intérieur d'une zone ( $m^2$ )
$b_{h,i}, c_{h,i}, d_{h,i}$	: Coefficients de la fonction de transfert pour un mur <b>i</b> ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , $W/m^2 \cdot ^\circ C$ et sans dimension respectivement)
Cap	: Capacitance thermique totale de l'intérieur d'une zone qui n'inclut pas la masse des murs internes et externes ( $kJ/^\circ C$ )
$c_p$	: Capacité thermique de l'air ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$C_{peau}$	: Capacité thermique de l'eau ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$e$	: Efficacité globale de la serre à capter le rayonnement solaire (--)
$E_c$	: Diffusion massique de l'air lors de l'évaporation à la surface du sol ( $kg \text{ d'air } / m^2 \cdot s$ )
$F_{i,j}$	: Facteur de forme pour l'échange radiatif entre le mur <b>i</b> et <b>j</b> (--)
$fp$	: Rapport entre la hauteur actuelle du mur de plants de tomates sur la hauteur maximale qu'il peut atteindre (--)
$h_{c,i}$	: Coefficient de transfert de chaleur par convection à la surface interne du mur ou du fenêtrage <b>i</b> ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$h_{c,o}$	: Coefficient de transfert de chaleur par convection à la surface externe des murs et des fenêtrages ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$H_D$	: Diffusion massique de l'air lors de la condensation ( $kg \text{ d'air } / m^2 \cdot s$ )
$h_{feuille}$	: Coefficient de transfert de chaleur par convection à la surface des feuilles des plants de tomates ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$hp$	: Hauteur du mur de plantes (m)
$h_{r,ij}$	: Coefficient d'échange radiatif (infrarouges longs) entre les surfaces <b>i</b> et <b>j</b> ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$H_s$	: Hauteur du rez-de-chaussée de la serre (m)
$h_{vapo}$	: Chaleur latente d'évaporation de l'eau (2454 kJ/kg)
$I$	: Rayonnement solaire global externe ( $W/m^2$ de surface horizontale)
$I_{act}$	: Niveau d'activités des personnes présentes dans la serre (code TRNSYS)
$IbT_{5\_}$	: Rayonnement solaire direct qui arrive perpendiculairement au fenêtrage 5 (W)
$It_i$ ou $IT_i$	: Rayonnement solaire global incident ( $W/m^2$ de surface horizontale)
$k$	: Conductivité thermique ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
$K_1, K_2, K_3$	: Coefficients qui caractérisent l'étanchéité de la zone ( $h^{-1}$ , $h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ et $h^{-1} \cdot (m/s)^{-1}$ respectivement)

$K_s$	: Conductivité thermique de 0.45 m en épaisseur de sol entre les fondations ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$L$	: Épaisseur du mur de terre ou de son isolant (m)
$LAI$	: «Leaf Area Index», surface totale d'un côté de toutes les feuilles par mètre carré de plancher ( $m^2/m^2$ )
$L_e$	: Nombre de Lewis pour l'eau = 0.89 (--)
$l_s$	: Largeur de la serre (m)
$L_s$	: Longueur de la serre (m)
$\dot{M}_{cond, i}$	: Taux de condensation à la surface du fenêtrage <b>i</b> (kg/s)
$\dot{M}_{condmax}$	: Taux de condensation maximal permis = 0.11 kg/h à $v = 0.5$ m/s
$\dot{M}_{convec.}$	: Débit d'air déplacé par convection naturelle à l'intérieur de la serre (kg/s) indice <b>max</b> ==> débit maximal de convection naturelle permis dans la serre ( $v = 0.045$ m/s)
$\dot{M}_{évap}$	: Taux d'évaporation d'eau du mur de plants de tomates (kg/s)
$\dot{M}_{infl}$	: Débit d'air qui s'infiltré dans la serre (kg/s)
$M_s$	: Hauteur du mur isolé (côté est) de la serre (m)
$\dot{M}_v$ ou $\dot{M}_{vin}$	: Débit de l'air d'aération (ventilation) (kg/s)
$N_L$	: Nombre de lampes pour l'éclairage artificiel (--)
$N_{pepl}$	: Nombre de personnes dans la serre (--)
$\dot{Q}_{0-1}$	: Conductance à travers les fondations isolées ( $W/^\circ C$ )
$\dot{Q}_{0-2}$	: Conductance sous les fondations isolées ( $W/^\circ C$ )
$\dot{Q}_{bsi}$	: Rayonnement solaire direct qui a passé à travers le fenêtrage <b>i</b> (W)
$\dot{Q}_{c, i}$	: Chaleur sensible échangée par convection à la surface du mur ou du fenêtrage <b>i</b> (W)
$\dot{Q}_{cfeuille}$	: Chaleur sensible échangée par convection à la surface de toutes les feuilles des plants de tomates (W)
$\dot{Q}_{diff i}$	: Rayonnement solaire diffus qui a passé à travers le fenêtrage <b>i</b> (W)
$\dot{Q}_{evasol}$	: L'énergie absorbée par l'évaporation à la surface du sol (W)
$\dot{Q}_{feuille}$	: L'énergie absorbée par l'évapotranspiration produit par le mur de plants de tomates (W)
$\dot{Q}_{fuite}$	: Chaleur échangée entre les 2 zones par un mouvement d'air de convection naturelle qui s'infiltré à travers la toile thermique dû à son manque d'étanchéité (W)
$\dot{q}_i$	: Transfert de chaleur à travers la paroi <b>i</b> ( $W/m^2$ )
$\dot{Q}_{infl}$	: Pertes ou gains de chaleur sensible dus aux infiltrations (W)
$\dot{Q}_{int}$	: Gains internes de chaleur sensible autre que le système de chauffage, le rayonnement de l'éclairage et les personnes (W)

$\dot{Q}_{IR_{rez}}$	: Énergie lumineuse fournie au rez-de-chaussée par l'éclairage artificiel (W)
$\dot{Q}_{natu.}$	: Chaleur échangée entre les 2 zones par un mouvement d'air de convection naturelle (W)
$\dot{Q}_{r, i}$	: Gains ou pertes radiatives totales par infrarouges longs du mur ou du fenêtrage <b>i</b> (W)
$\dot{Q}_{s, 6-}$	: Rayonnement solaire qui passe à travers le plafond du rez-de-chaussée (W)
$\dot{Q}_{sens}$	: Chaleur sensible qui doit être fournie à la zone pour maintenir la température au niveau désiré (W)
$\dot{Q}_{pepl}$	: Gains de chaleur sensible générés par les personnes (W)
$\dot{Q}_{surpl.}$	: Chaleur échangée entre les 2 zones par un mouvement d'air de convection naturelle. Ce transfert de chaleur est produit par la température élevée de l'air à la sortie du système de chauffage (W)
$\dot{Q}_v$	: Chaleur sensible fournie par la ventilation (W)
$\dot{Q}_z$	: Chaleur sensible provenant d'une zone adjacente à celle étudiée (W)
R	: Résistance thermique ( $m^2 \cdot ^\circ C / W$ )
$\dot{S}_s$	: Rayonnement global reçu par le mur de plants de tomates (solaire, éclairage artificiel, équipements et personnes) (W)
$s_i$	: L'ensemble des gains de rayonnement en provenance du soleil, des lumières, des équipements et des personnes ( $W/m^2$ )
t	: temps du présent pas de temps (s)
$\Delta t$	: Pas de temps (s)
T	: Température ( $^\circ C$ )
$\Delta T$	: Écart de température ( $^\circ C$ )
$\bar{T}_{1-2}$	: $= \frac{1}{2} (\bar{T}_1 + \bar{T}_2)$ ( $^\circ C$ )
$\bar{T}_1$	: Température moyenne mensuelle à 0.45 m de profond dans le sol ( $^\circ C$ )
$\bar{T}_2$	: Température moyenne mensuelle à 1.35 m de profond dans le sol ( $^\circ C$ )
$T_a$ ou $T_{air}$	: Température de l'air ambiant ( $^\circ C$ )
$T_e$	: Température du cabanon adjacent à la serre ou température dans le sol extérieur à la serre $\bar{T}_{1-2}$ ( $^\circ C$ )
$T_{eq, i}$	: Température équivalente (qui inclut le rayonnement) à la surface interne du mur ou du fenêtrage <b>i</b> ( $^\circ C$ )
$T_{feuille}$	: Température des feuilles des plants de tomates ( $^\circ C$ )
$\bar{T}_{fond}$	: Température moyenne annuelle entre les fondations ( $^\circ C$ )
$T_{sa, i}$	: Température sol-air de la surface extérieure du mur ou du fenêtrage <b>i</b> ( $^\circ C$ )
$T_{s, i}$ ou $T_{s, j}$	: Température à la surface interne du mur ou du fenêtrage <b>i</b> ou <b>j</b> ( $^\circ C$ )
$T_{ZF}$	: Température de la zone à la fin du pas de temps ( $^\circ C$ )
$T_{ZI}$	: Température de la zone au début du pas de temps ( $^\circ C$ )

$T_{\text{rez, max}}$	: Température de l'air au rez-de-chaussée qui est la plus élevée (°C)
$U_{0.5 \text{ ou } 0.8 \text{ ou } 1.6}$	: Coefficient de transfert global de chaleur d'un fenêtrage selon la vitesse du vent (0.5 ou 0.8 ou 1.6 m/s) (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{buée}}$	: Coefficient de transfert global de chaleur d'un fenêtrage, mais avec condensation sur sa surface interne (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{fenêtrage}}$	: Coefficient de transfert de chaleur du fenêtrage (W/m <sup>2</sup> .°C)
$\bar{U}_{\text{fond}}$	: Conductance globale du sol entre les fondations et le sol à l'extérieur pour une profondeur de 0.45m (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_i$	: Coefficient de transfert global de chaleur du mur ou du fenêtrage i (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{natu.}}$	: Coefficient de transfert de chaleur entre le rez-de-chaussée et l'entre-toit lorsqu'il n'y a pas de toile thermique (W/m <sup>2</sup> .°C)
$\bar{U}_{\text{plancher}}$	: Coefficient de transfert de chaleur global du plancher (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{sec}}$	: Coefficient de transfert de chaleur global d'un fenêtrage, mais sans condensation sur sa surface interne (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{terre}}$	: Coefficient de transfert de chaleur dans le sol (W/m <sup>2</sup> .°C)
$U_{\text{toile}}$	: Coefficient de transfert de chaleur à travers la toile thermique (W/m <sup>2</sup> .°C)
$v$	: Vitesse du déplacement de l'air à l'intérieur de la serre (m/s)
$V_a$	: Volume de la zone (m <sup>3</sup> )
$W \text{ ou } \text{Vent}$	: Vitesse du vent (m/s)
$w$	: Humidité absolue (kg eau / kg air)
$w_{s,i}$	: Humidité absolue à la surface interne du fenêtrage i (kg eau / kg air)

### Lettres grecques

$\alpha_i$	: Coefficient d'absorption du rayonnement lumineux du mur ou du fenêtrage i (--)
$\alpha_l$	: Coefficient d'absorption du rayonnement lumineux dans le calcul de l'évapotranspiration (--)
$\alpha_p$	: Coefficient d'absorption du rayonnement lumineux à travers une culture de plants de tomates (--)
$\alpha_r$	: Coefficient d'absorption des infrarouges longs dans le calcul de l'évapotranspiration (--)
$\epsilon_{\text{buée}}$	: «Émissivité» apparente d'un recouvrement transparent, mais avec condensation sur sa surface interne (--)
$\epsilon_{\text{sec}}$	: «Émissivité» apparente d'un recouvrement transparent, mais sans condensation sur sa surface interne (--)
$\rho$	: Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_i$	: Coefficient de réflexion lumineuse à la surface interne du mur ou du

	fenêtrage $i$ (--)
$\rho_p$	: Coefficient de réflexion lumineuse à la surface des plants de tomates (--)
$\tau_{buée}$	: Transmission lumineuse à travers un recouvrement transparent, mais avec condensation sur sa surface interne (--)
$\tau_p$	: Coefficient de transmission lumineuse à travers une culture de plants de tomates (--)
$\tau_{sec}$	: Transmission lumineuse à travers un recouvrement transparent, mais sans condensation sur sa surface interne (--)
$\gamma_L$	: Interrupteur de l'éclairage artificiel (= 0 --> éteint; = 1 --> allumé)
$\gamma_{pepl}$	: Présence de personnel dans la serre (= 0 --> non occupée; = 1 --> occupée)

### Indices et sous-indices

a	: L'air provient du milieu ambiant (extérieur)
convec.	: L'air provient d'une zone (entre-toit ou rez-de-chaussée) par mouvements de convection
éclairage	: Avec éclairage artificiel seulement
h	: Le pas de temps actuel (=0) ou précédent (=1)
i	: Numéro d'une surface (mur ou fenêtrage)
isolant	: Fait référence à l'isolant qui compose le mur simulant les pertes par les fondations
j	: Numéro d'une surface (mur ou fenêtrage)
max	: La valeur maximale possible
moyrez	: Conditions moyennes de l'air provenant du rez-de-chaussée ( $T = 20^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 70%)
nuît	: Du coucher au lever du soleil
obscurité	: Sans aucun rayonnement lumineux
rez	: Fait référence au rez-de-chaussée
soleil	: Avec rayonnement solaire seulement
terre	: Fait référence à la terre qui compose le mur simulant les pertes par les fondations
toit	: Fait référence à l'entre-toit
v	: Ventilation (l'air d'aération)
z ou zone	: Fait référence à une zone



## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Au Québec, environ 25% des frais variables d'exploitation de plus de 1300 entreprises serricoles sont imputables au chauffage et ils représentent une sérieuse menace à la viabilité économique de cette industrie [1]. Le problème de chauffage des serres est largement attribuable aux pertes de chaleur qu'elles subissent. Durant le jour, l'excédent de chaleur solaire est évacué à l'extérieur (perte d'énergie) tandis qu'une source de chaleur auxiliaire doit alimenter la serre pendant la nuit (consommation d'énergie). Cette façon d'exploiter les serres est donc inefficace du point de vue énergétique et s'avère, à long terme, coûteuse. De surcroît, la faible masse thermique des serres les rend vulnérables aux pannes de chauffage qui peuvent entraîner en quelques heures la perte complète d'une récolte de quelques mois.

Actuellement, la technologie ne nous permet pas d'accroître substantiellement la faible résistance thermique des parois de la serre sans en affecter la transmission lumineuse. Une forte transmission est indispensable à l'obtention d'un bon rendement sur la croissance des plantes. Par conséquent, à l'automne et au printemps, les serriculteurs au Québec sont moins compétitifs que ceux des régions plus clémentes (Ontario, U.S.A., Israël, Mexique, etc.). Ils sont presque totalement absents de la production en hiver ( $< 5\%$ ) [1]. La production maraîchère et ornementale au Québec est donc petite pendant la période froide de l'année, ce qui réduit la compétition et accroît les prix des produits. Malheureusement, cette plus forte marge de profit bénéficie aux pays étrangers.

Si l'industrie serricole veut survivre à la globalisation des marchés, il faudra trouver un moyen de réduire sa consommation énergétique de chauffage (111 GWh par an [2]).

Une façon d'atténuer ce problème de consommation est de stocker l'excédent de chaleur solaire capté durant le jour pour la récupérer pendant la nuit. Généralement, on emploie des méthodes de stockage par chaleur sensible dues à leur simplicité et à leurs plus faibles coûts. Parmi elles, on retrouve le stockage par l'intermédiaire de réservoirs d'eau répartis dans la serre afin de capter le rayonnement solaire. Une autre méthode consiste à récupérer l'excédent de chaleur contenu dans l'air de la serre en le faisant circuler à travers un lit de pierre. Le stockage se fait dans l'amoncellement de pierres que l'on a placé dans un caisson de béton sous le plancher. Par contre, une méthode moins encombrante et surtout, moins coûteuse, pourrait être encore plus efficace que celles existantes. En effet, il est envisageable de recourir à la masse thermique du sol de la serre pour stocker la chaleur. Pour ce faire, on enterre des tuyaux flexibles dans le sol sous le plancher à l'intérieur desquels on fait circuler l'air de la serre. Le sol devient donc l'élément de stockage et de déstockage de chaleur sensible [3]. La figure 1.1 illustre le fonctionnement de ce système.

Un prototype expérimental a été construit et expérimenté à l'Institut de technologie agro-alimentaire de La Pocatière. Ce prototype montre que ce système est très prometteur pour réaliser d'importantes économies d'énergie [4]. Malgré tout, ce système demeure peu connu et peu utilisé, car l'information technique disponible est morcelée, incomplète et pas forcément transposable d'une serre à l'autre (climat et propriétés des sols variables).

C'est dans cette optique que le projet ÉCHAS (ÉCHangeur-Accumulateur de chaleur dans le Sol) du groupe THERMAUS (groupe de recherche en THERMique et en Aérodynamique de l'Université de Sherbrooke) est né. Ce projet se divise en deux sous-projets. L'un a pour objet d'étudier le comportement thermique dynamique du sol dans lequel on fait circuler le caloporteur (air) à l'intérieur de tuyaux. L'autre, qui est l'objet du présent mémoire, se veut une simulation du comportement thermique dynamique de serres typiques

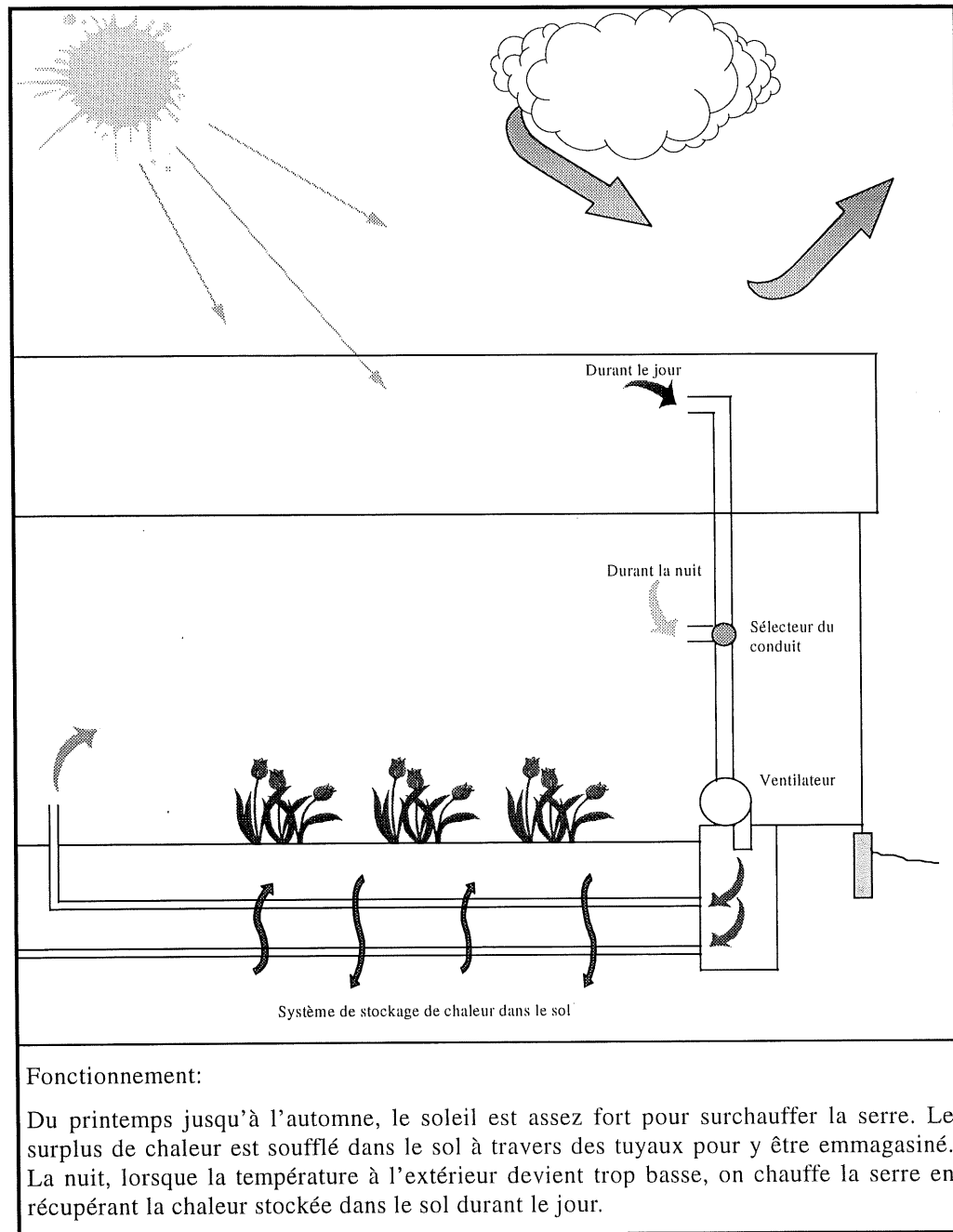


Figure 1.1 Principe du stockage de chaleur dans le sol

au Québec. Ce dernier a pour principal objectif de calculer la quantité maximale de chaleur que la serre peut recueillir du soleil et emmagasiner dans le sol, de même que le chauffage requis pendant la nuit (lors du déstockage). La figure 1.2 montre un schéma représentant les relations qu'il y a entre les deux sous-projets.

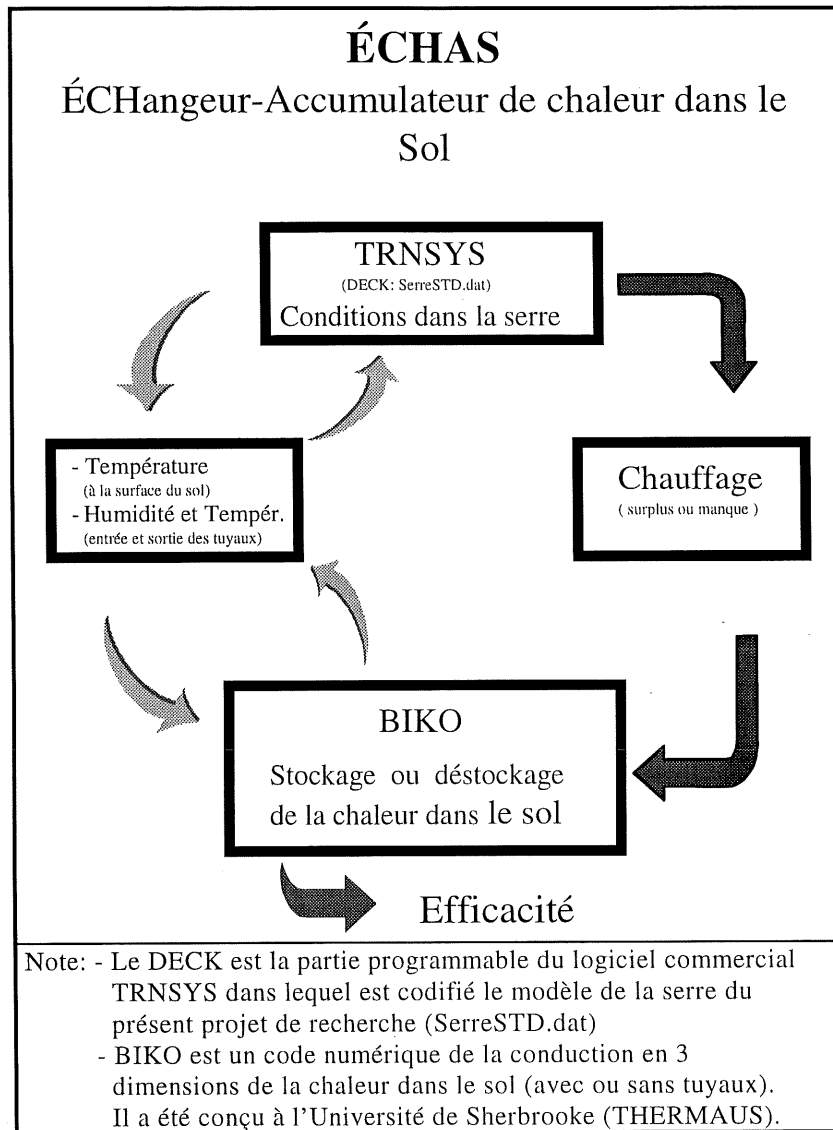


Figure 1.2 Relations entre les 2 sous-projets constituant ÉCHAS

## 1.2 Revue bibliographique

Dans la littérature, on retrouve plusieurs études sur la modélisation du comportement thermique dynamique d'une serre. En règle générale, on peut classer ces études en 2 groupes. Le premier groupe se veut une modélisation des serres en tant que bâtiments standard. Cela signifie que ces modèles calculent le bilan de chauffage en tenant compte des principaux gains d'énergie (rayonnement solaire et éclairage artificiel), de même que les déperditions

thermiques à travers les parois et par infiltrations. Le second groupe, quant à lui, modélise les serres en tant que bâtiments «réactifs». Ce groupe est basé sur le modèle standard auquel on rajoute la présence active des plantes cultivées. En effet, les plantes réagissent au rayonnement lumineux en transpirant une quantité d'eau équivalente à l'énergie absorbée afin d'éviter une surchauffe corporelle. Par conséquent, les plantes contribuent à augmenter le taux d'humidité dans la serre. Le modèle doit alors tenir compte de la ventilation qui évacue le surplus d'humidité et de l'augmentation de la conductance du fenêtrage occasionnée par la condensation. Il doit également tenir compte de l'énergie solaire que les plantes absorbent pour évaporer l'eau, mais qui ne contribue pas à réchauffer la serre.

Dans les sous-sections suivantes, on commentera les principaux travaux que l'on retrouve dans ces 2 sous-groupes.

#### 1.2.1 Bilan énergétique standard

Les modèles les plus simples de cette catégorie sont surtout utilisés pour déterminer la capacité minimale que doit avoir le système de chauffage pour faire face aux conditions climatiques extrêmes. Ces modèles tiennent généralement compte des pertes par convection et par infiltration. On peut citer le modèle standardisé du ASAE [5]:

$$\begin{array}{l} \text{Chauffage} \\ \text{requis} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Chaleur perdue} \\ \text{par les parois} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Chaleur perdue par} \\ \text{les infiltrations} \end{array} \quad (1.1)$$

D'autres modèles ont également été conçus pour déterminer la capacité minimale du système de chauffage, mais en plus, ils permettent d'évaluer la consommation mensuelle d'énergie. Pour en arriver à cette fin, ils doivent nécessairement tenir compte des gains solaires du site considéré. Le C.R.E.A.Q. a développé un modèle de ce genre que l'on peut résumer de la façon suivante [6]:

$$\begin{array}{l} \text{Chauffage} \\ \text{requis} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Chaleur perdue} \\ \text{par les parois} \\ \text{(infiltrations incluses)} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Gains solaires} \\ \text{(transmission lumineuse} \\ \text{constante des parois)} \end{array} \quad (1.2)$$

L'inconvénient de ce modèle est qu'il utilise des valeurs annuelles moyennes pour son coefficient de transfert global de chaleur et pour le taux de pénétration du rayonnement solaire. Par conséquent, on ne peut pas trop se fier aux résultats générés par les mois qui ont des valeurs pour le coefficient et pour le taux de pénétration loin de la moyenne. Pour éliminer ce problème, Caouris et al. ont développé un modèle beaucoup plus détaillé [7]. Ce dernier tient principalement compte des points suivants:

- de la variation de la transmission lumineuse du recouvrement selon l'angle d'incidence;
- de la variation de la conductance des parois selon les conditions climatiques;
- des infiltrations;
- des échanges radiatifs entre les murs et entre la serre avec son environnement;
- de la capacité thermique de la serre;
- de l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration des plantes;

Ce modèle peut être utilisé pour évaluer la demande horaire de chauffage sur toute une année. Par contre, les résultats ne sont précis que pour les cultures qui génèrent un faible taux d'évapotranspiration (plantes ayant un feuillage peu abondant par unité de surface de plancher). La raison est que ce code numérique ne fait pas de bilan d'humidité. Donc, il ne tient pas compte des pertes par ventilation dues au contrôle de l'humidité. Puisque au Québec, les tomates et les concombres, qui ont des feuillages abondants, sont les légumes les plus cultivés [1], le modèle de ce présent rapport devra absolument tenir compte des bilans d'humidité.

#### 1.2.2 Bilan énergétique «réactif»

Dans la littérature, il est possible de trouver certains auteurs qui ont élaboré des modèles de serres très détaillés et qui tiennent compte des bilans d'humidité. En fait, c'est surtout à cause de la forte montée des coûts de l'énergie dans les années 1970, et au début de l'automatisation des serres dans les années 1980, que l'on a voulu mieux comprendre le comportement global de ces abris de cultures.

En 1969, Takakura et al. ont été parmi les premiers à concevoir un code numérique presque complet du comportement thermique et massique d'une serre dans le temps [8]. Malgré les ressources informatiques limitées de l'époque, ils ont quand même été capables d'inclure les paramètres suivants dans leur modèle:

- variation de la transmission lumineuse du recouvrement selon l'angle d'incidence;
- variation de la conductance des parois selon la vitesse du vent;
- conduction dans le sol (calculée par les différences finies)
- échanges radiatifs entre les murs;
- capacité thermique de la serre;
- évapotranspiration des plantes;
- évaporation à la surface du sol;
- ventilation;
- température à la surface des plantes.

Par contre, leur modèle ne considère pas les infiltrations d'air, même si à l'époque les serres étaient généralement moins étanches qu'elles le sont aujourd'hui. De plus, il ne tient pas compte de la présence d'une toile thermique la nuit. Mais, le maillon faible de leur modèle est la représentation des plantes. Ces auteurs représentent l'ensemble de la culture par un volume constant dont la transmission lumineuse à travers ce volume est peu précise. De plus, ils ne considèrent pas de variations de la conductance du fenêtrage lorsqu'il y a de la condensation.

Malgré toutes les recherches effectuées, on n'a pu trouver un auteur qui avait conçu un modèle aussi précis que celui de Takakura et al. et qui offrait une représentation réaliste de la transmission lumineuse à travers une culture en rangées. De plus, on cherchait également un modèle qui tient compte de la croissance des plantes.

Pour ce qui est de l'influence de la condensation sur les parois, l'équipe de recherche Chandra et al., de même que celle d'Arinze et al. ont tenté d'inclure ce paramètre à leur modèle [9, 10]. Pour eux, l'ensemble de l'énergie latente libérée lors de la condensation contribuait à augmenter l'énergie interne de la serre. Par contre, selon Delwiche et Willits.,

cette hypothèse est fausse [11]. En effet, ceux-ci ont mesuré en laboratoire que les déperditions thermiques à travers les parois augmentaient jusqu'à 12% selon le taux de condensation. La raison est que le phénomène de condensation s'accompagne d'un phénomène d'évaporation et d'émission radiative dont le bilan énergétique global est négatif.

La recherche bibliographique nous a montré que les modèles qui ont été conçus pour représenter le bilan énergétique dynamique d'une serre sont très détaillés, mais incomplets. On a vu qu'il y a encore des améliorations à faire sur la représentation des plantes et des effets de la condensation sur les parois.

### **1.3 Objectifs**

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, on se propose de développer le premier sous-projet du programme ÉCHAS, soit la simulation et l'étude du comportement thermique dynamique d'une serre commerciale typique au Québec.

Pour effectuer efficacement cette analyse, on devra déterminer les paramètres permettant de représenter les serres typiques québécoises. Parmi ceux-ci, on peut citer:

- les sites qui représentent le mieux l'ensemble de la production serricole québécoise (climat);
- la forme et les dimensions représentatives d'une serre commerciale;
- l'orientation de la serre;
- les types de recouvrement utilisés;
- les conditions de croissance de la culture serricole la plus répandue.

Après avoir défini ces paramètres, on modélisera l'ensemble du comportement énergétique de la serre à l'aide du logiciel commercial TRNSYS. De cette modélisation, on fera une analyse sur les points suivants pour une année complète:

- Les effets créés par la modification de certains paramètres sur une serre:
  - le choix du type de recouvrement;
  - le mur nord isolé



- le regroupement de serres.
  - l'emploi d'une toile imperméable blanche sur le sol;
  - le choix du type de plantes et le moment de la culture.
- Les effets créés par la présence des plantes:
    - la fraction de l'énergie solaire absorbée par les plantes et convertie en humidité (en fonction de leur croissance);
    - les pertes dues à la ventilation du surplus d'humidité;
    - l'effet et la fréquence d'apparition de la condensation sur le fenêtrage;
  - L'énergie pouvant être stockée:
    - le surplus de chaleur que l'on doit évacuer à l'extérieur, ou bien, que l'on pourrait stocker, selon la région et le moment de l'année;
    - les modifications que l'on peut apporter pour permettre d'allonger la période de stockage.

#### **1.4 Vue d'ensemble**

Dans le présent mémoire, on se propose, en premier lieu, de définir les caractéristiques générales des serres construites au Québec. Cette définition présentée dans le chapitre 2 est donnée du point de vue des matériaux, des types de culture et de leurs conditions de croissance, de même que du choix des sites de référence.

Dans le chapitre 3, on fixe d'abord les hypothèses simplificatrices du modèle et par la suite, les équations régissant le bilan énergétique global sont posées. Finalement, on porte une attention particulière sur la modélisation de la croissance des plantes, de leur évapotranspiration, de la condensation sur le fenêtrage et finalement, de la présence ou non d'une toile thermique.

Le chapitre 4 vient valider l'ensemble du modèle tant du point de vue global que pour chacune des sous-routines particulières (évapotranspiration, condensation, etc.).

Finalement, dans le chapitre 5, les résultats numériques sont présentés et certaines améliorations simples et peu coûteuses sont proposées.

## 2. CARACTÉRISTIQUES

### 2.1 Caractéristiques des serres commerciales

On retrouve plusieurs types d'abri de culture dans l'industrie agricole au Québec. Les plus rudimentaires sont constitués d'une simple toile déposée directement sur les rangées de plants dans un champ. À l'autre extrême, ces abris peuvent être représentés par un bâtiment rigide, à l'intérieur duquel, tous les paramètres environnementaux sont contrôlés.

Pour les fins de cette étude, on ne va considérer que la serre commerciale. Il ne faut pas confondre avec les tunnels commerciaux. Ces derniers peuvent avoir la même forme que les serres, mais ils ne sont, en réalité, que des abris pour saisons clémentes (composés d'une simple couche de polyéthylène et non chauffés).

Pour bien représenter une serre commerciale typique au Québec, il faut tenir compte de plusieurs caractéristiques. Parmi les principales, on retrouve la géométrie, l'orientation, le recouvrement, l'isolation, le type de culture et, finalement, le contrôle de l'environnement interne de la serre.

#### 2.1.1 Géométrie

Le climat québécois ne permet pas l'emploi de n'importe quelle forme de serre. Le type de construction doit surtout tenir compte de la faible luminosité à l'automne et à l'hiver, de même que prévenir les accumulations de neige sur la toiture. La figure 2.1 montre les trois principales structures de serre employées au Québec.

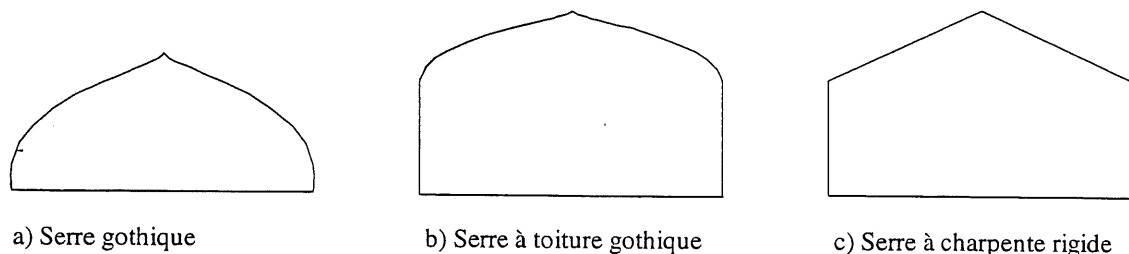


Figure 2.1 Modèles de serre adaptés au climat québécois [12, 13]

Pour chacun de ces modèles, les dimensions peuvent varier beaucoup. En général, la largeur varie de 6.5 à 9.0 m, la longueur de 30 à 45 m et, finalement, la hauteur varie entre 3.6 et 4.3 m.

L'avantage des modèles **b** et **c** est qu'ils peuvent être jumelés côte à côte dans le but de réduire les déperditions thermiques et le dédoublement des équipements d'une serre à l'autre. Ce regroupement est surtout recommandé pour des superficies de production supérieures à 1500 m<sup>2</sup>. Aujourd'hui, on ne retrouve le modèle **c** que pour les structures en bois ou pour un recouvrement rigide tel que le verre.

### 2.1.2 Orientation

Au Québec, on recommande une orientation est-ouest de la serre. La première raison est qu'il est préférable de placer le côté le plus long face au sud en hiver, car l'altitude et l'azimut du soleil sont faibles [14]. Mais, il peut arriver que les bouts de serres jumelées forment une surface plus longue que la longueur de chacune des serres qui constituent l'ensemble. Dans ce cas, on recommande quand même une orientation est-ouest de chaque unité afin d'éviter les accumulations de neige entre les toits (vents dominants est-ouest) [12].

### 2.1.3 Recouvrement

Ce qui fait la particularité des serres, par rapport à un bâtiment normal, c'est évidemment leur recouvrement. Il faut donc attacher une importance particulière lors du

choix de celui-ci. Ce choix doit se faire en se basant sur les 5 ou 6 caractéristiques les plus importantes d'un recouvrement. La première est la transmissibilité lumineuse, suivie par la résistance thermique, vient ensuite, le coût et la durée de vie du matériel. Finalement, les propriétés antibuées (pas d'égouttement de la condensation) et opacité à la sortie des infrarouges longs vers l'extérieur peuvent représenter d'autres atouts à un revêtement. Le tableau 2.1 donne des exemples de matériaux employés comme revêtement de serre et les propriétés qui s'y rattachent.

TABLEAU 2.1 CARACTÉRISTIQUES DE DIFFÉRENTS RECOUVREMENTS TRANSPARENTS [12]

Matériau <sup>1</sup>	Épaisseur (mm)	Transmission (PAR) <sup>2</sup>	IR <sup>3</sup> (%)	Durée de vie (ans)	RSI (m <sup>2</sup> .°C/W)	Prix unitaire (\$/m <sup>2</sup> )
Verre	3	88	1	> 30	0.16	9.9 à 12
Polycarbonate (PC)	6 à 8 (évidé)	82	9	15 à 20	0.27	23 à 28
Polyéthylène (PE régulier)	0.1 par film	85 <sup>4</sup>	70 à 80 66 <sup>5</sup>	1 à 2	0.25	0.45
Polyéthylène (PE antibué)	0.15 par film	84 <sup>4</sup>	60 à 70 (sec) < 55 (buée) <sup>6</sup>	3	0.25	0.90

1 - Données basées sur l'utilisation en double paroi, sauf pour le verre.

2 - PAR signifie rayonnement actif pour la photosynthèse. On peut réduire ces valeurs d'environ 16% pour tenir compte de la saleté qui s'accumule sur le revêtement (1.7 g/m<sup>2</sup>) [15].

3 - IR signifie rayonnement infrarouge long (transmissibilité).

4 - Valeur estimée à partir de données du fabricant, pour une utilisation (à l'état neuf) en double paroi. Mais ces valeurs ne varient pas beaucoup avec le vieillissement [16].

5 - Selon le CPVQ [16].

6 - La condensation qui adhère à la paroi (pas d'égouttement) réduit de beaucoup les pertes IR à travers le recouvrement [17].

Dans le cadre de notre étude, on se basera sur 3 types de revêtement. Le premier sera le film de polyéthylène double antibué (0.15 mm par film) pour sa grande popularité. Ce dernier est très en vogue surtout à cause de son faible coût et de sa facilité d'installation. Dans la catégorie des recouvrements rigides, on utilisera le polycarbonate double (6 mm

évidé) pour sa popularité et le verre (3 mm) pour sa longue durée de vie, sa grande transmissibilité lumineuse et sa grande opacité aux infrarouges longs (mais, pour une faible résistance thermique).

#### 2.1.4 Isolation

L'inconvénient majeur des matériaux transparents est qu'ils offrent une faible résistance thermique, engendrant ainsi des coûts de chauffage élevés. Pour beaucoup de serriculteurs, la tentation est grande de vouloir isoler le mur nord et parfois les murs aux extrémités est et ouest. Mais, selon J.-M. Boudreau, responsable du développement et du transfert technologique en cultures abritées au Québec [18], cette pratique est peu recommandée, surtout pour les serres individuelles. En effet, à l'automne, la lumière diffuse peut représenter jusqu'au 2/3 de la luminosité. L'isolation du mur nord peut donc enlever une partie importante de l'énergie lumineuse nécessaire à la croissance des plantes. Par contre, l'isolation jusqu'à 1.2 m (à partir du sol) des murs est et ouest n'a pas d'impact négatif important. Un cas, où il peut être efficace d'isoler le mur nord, c'est avec des serres jumelées dont la largeur totale est comparable à la longueur. Dans ce cas, l'obstruction lumineuse créée par le mur isolé est petite comparativement à l'ensemble du fenêtrage.

Généralement, les parties isolées de la serre ont un RSI qui varie entre 3.4 et 5.25 m<sup>2</sup>.°C/W (R-20 à R-30) et sont peintes en blanc pour ne pas assombrir l'intérieur [12].

Les fondations peuvent aussi être isolées, même si elles ne représentent qu'environ 2.5% des pertes thermiques globales d'une serre [12, 19]. Cette isolation est surtout utile pour les cultures dans le sol, dont la température au niveau des racines peut jouer un rôle important sur la croissance des plantes.

Les fondations sont généralement composées d'un mur de béton (plein ou en blocs de béton) et isolées avec un RSI de 1.8 m<sup>2</sup>.°C/W (R-10) [12, 20].

### 2.1.5 Type de culture

Au Québec, on divise en 2 catégories les plantes cultivées en serre: les cultures maraîchères et ornementales, chacune représentant pour environ 50% de la superficie de la production provinciale [1]. De plus, près de la moitié des serriculteurs pratiquent la culture sur table et l'autre moitié cultivent dans le sol [18].

Dans le cadre de notre étude, il est évident que l'on ne peut pas simuler toutes les variétés de plantes, surtout qu'il existe une très grande diversité de plantes ornementales. Par contre, 94% de la production maraîchère (en superficie) est composée de seulement 3 sortes de légumes: tomates (63%), concombres (22%) et laitue (9%). Puisque les plants de tomates et de concombres ont des dimensions similaires, il est raisonnable de choisir le plant de tomates comme référence pour toutes nos simulations. De cette façon, on touchera près de 85% de la production maraîchère. Finalement, avec une production de tomates on aura, nécessairement, une culture en sol ou au niveau du sol (culture hydroponique).

### 2.1.6 Contrôle de l'environnement interne de la serre

Pour des fins de rentabilité, on doit faire croître les cultures dans des environnements optimaux. Il est donc important de bien contrôler la température de l'air et du sol, l'arrosage, les nutriments, l'humidité, l'éclairage et le  $\text{CO}_2$ . Tous ces facteurs, sauf les nutriments, doivent être considérés dans le bilan énergétique, car chacun d'eux peut influencer les autres. Pour contrôler ces facteurs, une serre nécessite l'emploi d'un système de chauffage, de ventilation, d'éclairage et d'arrosage. On ne va pas considérer la production artificielle de  $\text{CO}_2$ , mais on tiendra compte de son renouvellement par ventilation.

**Le système de chauffage** n'est pas seulement utile en saison froide, mais aussi lors des nuits fraîches d'été. La capacité de chauffage doit être d'au moins  $380 \text{ W/m}^2$  pour les serres individuelles et  $320 \text{ W/m}^2$  pour les serres jumelées [12]. Les systèmes de chauffage à l'eau chaude et à air chaud soufflé sont les plus utilisés. Le chauffage radiatif est peu utilisé,

puisque'il chauffe trop directement les plantes [18]. Pour la même raison, la température de sortie de tout système de chauffage doit être inférieure à 60°C.

L'emploi d'un rideau thermique au-dessus des plantes peut réduire les coûts de chauffage de 25 à 30% [3, 12, 18]. Dans le cas du sol, il n'est pas toujours possible de maintenir une température adéquate seulement par une simple convection naturelle au niveau du plancher. Cela est surtout vrai pour une culture faite pendant l'hiver ou tôt au printemps. Dans ce cas, on doit ajouter un système de chauffage par tuyaux d'eau chaude ou par fils chauffants dans le sol.

**Le système de ventilation** est conçu pour évacuer le surplus de chaleur en été par temps très ensoleillé (jusqu'à 1 changement d'air par minute pour maintenir un  $\Delta T \leq 6^\circ\text{C}$  [12]). Il sert, également, à contrôler les excès d'humidité et le renouvellement du  $\text{CO}_2$  (au moins 2 fois par jour [12]). Parfois, on génère une recirculation d'air à l'intérieur de la serre (par des ventilateurs) pour permettre une uniformisation de l'environnement interne et une maximisation des échanges gazeux au niveau de la feuille. L'inconvénient de cette recirculation est qu'elle augmente les pertes de chaleur au niveau des parois.

Les serriculteurs optent soit pour une ventilation forcée, soit pour une ventilation naturelle. Dans le premier cas, ce sont des ventilateurs axiaux à 2 vitesses qui sont généralement employés. La première vitesse (25 à 33% du maximum) est suffisante pour le contrôle de l'humidité et du  $\text{CO}_2$ , ou bien, lorsqu'il y a un peu de surchauffe dans la serre ( $24 < T < 27^\circ\text{C}$ ). La vitesse maximale est utilisée lorsque la température dépasse les  $27^\circ\text{C}$ . La ventilation naturelle, quant à elle, consiste à créer un effet cheminée en ouvrant des trappes sur la cime du toit et sur la partie inférieure des murs (trappes dont les dimensions sont de 15 à 25% de la surface du plancher [5]). Mais pour faciliter le contrôle des changements d'air, on ne considérera que la ventilation forcée.

**L'éclairage artificiel**, dans une moindre mesure, contribue lui aussi au bilan énergétique de la serre, surtout à l'automne et à l'hiver (faible ensoleillement). Généralement, l'industrie utilise des lampes au sodium à haute pression (HPS) de 400 W, dont 30% est converti en chaleur. On doit en installer au moins une pour chaque 8 m<sup>2</sup> de surface de plancher [12].

**L'arrosage** joue un rôle plus important sur le côté nutritif qu'énergétique, mais ce dernier n'est pas négligeable. En effet, en plus d'alimenter les plantes en eau, l'arrosage peut servir à augmenter le taux d'humidité et aussi, à réduire la température de l'air lorsqu'il y a surchauffe. Pour une journée printanière ou estivale chaude, sèche et ensoleillée, l'apport d'eau nécessaire peut atteindre jusqu'à 16 litres/jour·m<sup>2</sup> de plancher (forte évapotranspiration) [12]. Cette évapotranspiration crée une absorption importante d'énergie par chaleur latente. De plus, l'eau provient généralement d'un puits dont la température varie autour de 4°C. On doit tempérer cette eau dans des bassins à l'intérieur de la serre avant de la distribuer aux plantes (consommation supplémentaire d'énergie).

Idéalement, on recommande d'utiliser des systèmes d'arrosage goutte à goutte au niveau du sol plutôt qu'un système d'aspersion sur les feuilles. De cette façon, on réduit le taux d'humidité et les risques de maladies sur les plantes.

Finalement, puisque l'on ne modélise que la culture de plants de tomates, on peut énumérer les conditions environnementales optimales à l'intérieur de la serre pour une telle culture. Le tableau 2.2 montre ces conditions pour des plants de tomates après leur transplantation en terre.



**TABLEAU 2.2 PARAMÈTRES OPTIMAUX DE CULTURE D'UN PLANT DE TOMATES (APRÈS LA TRANSPLANTATION)**

Paramètre	Conditions optimums	Références
Température de l'air (sec)	21 à 25 °C (jour) et 15 à 18°C (nuit)	[21, 22]
Température du sol	18 à 20°C	[21]
Humidité relative	≈ 70%	[21]
Arrosage	1 à 2 litres / jour par plant dans le sol (plants matures)	[12]
Éclairage (soleil ou artificiel)	≥ 103 W/m <sup>2</sup> (17 200 lux ou 1600 bougies-pi.) durant 12h	[12]
CO <sub>2</sub>	350 ppm (atmosphérique) ou 1000 ppm (avec apport)	[20, 23, 24]

## 2.2 Caractéristiques des sites de référence

### 2.2.1 Choix des sites

Il existe 12 régions de production agricole au Québec. Parmi ces 12 régions, on peut ressortir les 4 principaux bassins de production serricole (selon le nombre de producteurs en pourcentage) [18]:

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Montréal  | 60%    |
| 2. Estrie et Bois-Francs                                       | 11.3%  |
| 3. Québec  | 10.5%  |
| 4. Bas-Saint-Laurent, Gaspésie,<br>Lac-Saint-Jean et Côte-Nord | 10.2 % |

Pour réaliser une étude pertinente, on choisit 3 villes dont les données météorologiques sont disponibles pour représenter l'ensemble de ces régions. La première, est évidemment Montréal, qui est le coeur de la production serricole au Québec. La deuxième est La Pocatière, car c'est la seule ville au Québec où on y retrouve une serre expérimentale avec

un échangeur-accumulateur de chaleur dans le sol. Bien que les données climatiques soient plus difficiles à obtenir, cette serre sera un atout précieux pour valider la phase 2 du projet ÉCHAS (simulation d'un échangeur-accumulateur de chaleur dans le sol). De plus, le climat de cette ville est représentatif de celui du centre du Québec. La dernière ville est Sept-Îles, dans le but de vérifier la rentabilité de construire des serres à une telle latitude. Le tableau 2.3 et la figure 2.2 montrent les conditions climatiques moyennes mensuelles pour les 3 sites choisis.

TABLEAU 2.3 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES MENSUELLES MOYENNES DES 3 SITES DE L'ÉTUDE [3, 25, 26 a à 26 d, 27, 28]

Site	Donnée météo.	Mois											
		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
La Pocatière	Température (°C) <sup>i</sup>	-11.3	-10.2	-4.4	2.8	9.9	15.7	18.7	17.3	12.6	6.9	0.4	-8.2
	Rayon. (kJ/m <sup>2</sup> .jour) <sup>ii</sup>	5171	8830	14117	16742	18985	20996	20051	16966	12780	8047	4523	4097
	Humidité (%) <sup>iii</sup>	76	76	75	73	70	71	73	74	76	75	78	78
	Vent (m/s) <sup>iv</sup>	4.36	4.39	4.47	4.08	3.75	3.64	3.47	3.33	3.42	4.00	4.06	4.17
Montréal Int'l. A. (Mirabel)	Température (°C)	-9.9	-8.8	-2.3	5.9	12.8	18.5	21.2	19.9	15.3	9.4	2.3	-6.6
	Rayonne. (kJ/m <sup>2</sup> .d)	5337	8540	12435	16082	18818	20103	20952	17130	13170	8244	4474	3815
	Humidité (%)	75	74	71	67	64	69	70	72	75	74	77	78
	Vent (m/s)	5.08	4.97	4.97	4.69	4.25	4.03	3.64	3.39	3.64	4.11	4.61	4.67
Sept-Îles	Température (°C)	-13.9	-12.7	-6.7	-0.3	5.7	11.6	15.1	14.2	9.6	4.0	-2.2	-10.4
	Rayonne. (kJ/m <sup>2</sup> .d)	4569	8177	12174	15061	18254	21500	18500	16677	11348	7453	4081	3097
	Humidité (%)	73	72	73	74	71	74	78	78	78	77	79	74
	Vent (m/s)	5.53	5.17	5.47	5.08	4.92	4.36	3.94	4.00	4.30	4.56	5.00	5.36

i Les températures sont données par le thermomètre sec.

ii Le rayonnement journalier à la ville de La Pocatière provient de l'interpolation linéaire entre celui à la ville de Québec et celui à la ville de Rivière du Loup.

iii L'humidité relative à la ville de La Pocatière provient de celle à la ville de Mont-Joli.

iv Le vent à la ville de La Pocatière provient des données de la ville de Rivière du Loup.

Notes: Les interpolations pour la ville de La Pocatière ont toujours été réalisées avec les données connues des villes les plus proches ou d'une ville côtière (humidité).

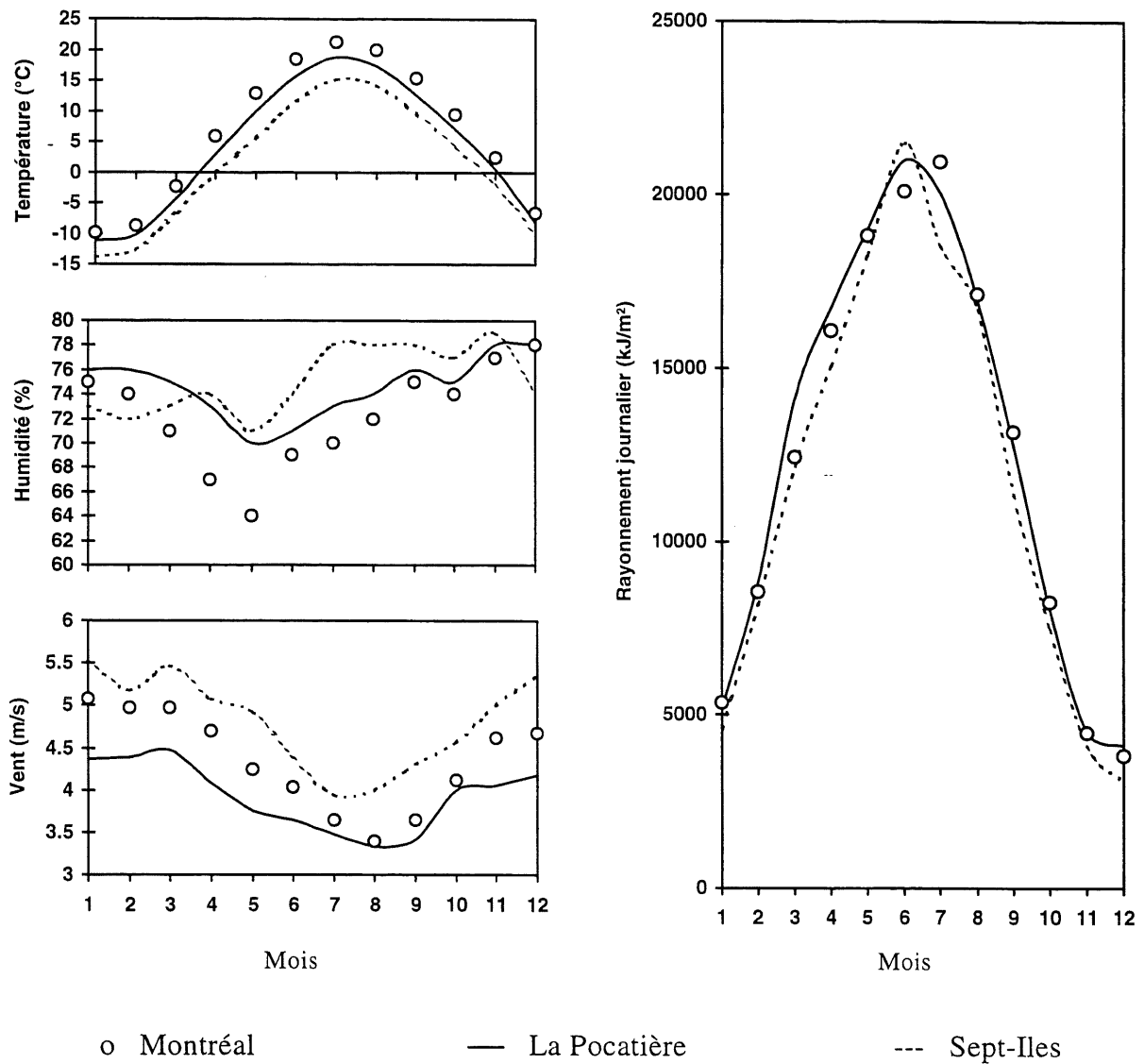


Figure 2.2 Comparaison graphique des 3 climats d'étude

### 2.2.2 Génération des climats

Les données météorologiques sont généralement compilées mensuellement. Ces valeurs brutes ne permettent pas de connaître les conditions de jour et de nuit, ni leur évolution durant chaque mois. Pour remédier à ce problème, le logiciel commercial TRNSYS permet de générer des valeurs horaires à partir de données brutes telles que celles qui figurent dans le tableau 2.3 [28]. Le logiciel utilise diverses corrélations pour la génération de données

horaires climatiques dont la méthodologie est décrite par Knight et al.[29]. Dans le cas de la génération horaire de l'humidité et du vent, ces corrélations suivent des fonctions aléatoires de distribution normale. Leur moyenne correspond aux valeurs moyennes mensuelles fournies par les données brutes, alors que l'écart-type pour l'humidité correspond à la variation journalière maximale de la température humide. Pour ce qui est de l'écart type du vent, il équivaut à 0.31 fois la vitesse moyenne mensuelle.

Toujours selon Knight, la température sèche peut également être générée de façon stochastique (méthode aléatoire), mais aussi selon une corrélation déterministe (méthode du cosinus). On a opté pour la méthode déterministe, parce qu'elle permet d'étudier plus facilement le comportement d'un bâtiment. En effet, bien qu'elle génère des moyennes journalières à tendance aléatoire, la distribution horaire de chaque journée suit toujours une «cosinusoidale». De cette façon, si une variable varie brusquement dans la serre, la cause ne pourra provenir d'une variation brusque de la température externe.

Le rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale est également basé sur les données brutes mensuelles, mais aussi sur la latitude du site. En connaissant cette latitude, le rayonnement horaire extraterrestre peut être calculé précisément. La différence entre la valeur mensuelle extraterrestre et celle mesurée au niveau du sol donne un indicatif des perturbations atmosphériques («ennuagement», brouillard, etc.) du site. De là, le logiciel TRNSYS peut, toujours à l'aide de certaines corrélations à tendance aléatoire, développer un profil horaire du rayonnement direct et diffus reçu au niveau du sol (par mètre carré de surface horizontale).

Finalement, on retrouve, à l'annexe A, un exemple sur les variations horaires du climat à la ville de La Pocatière. Plus précisément, cet exemple porte sur les variations horaires mensuelles moyennes de la température sèche et de l'intensité du rayonnement solaire. L'illustration est basée sur les 4 mois les plus représentatifs de l'année: le plus froid (janvier), le plus chaud (juillet) et 2 mois intermédiaires pour représenter le printemps et l'automne (avril et octobre).

Maintenant que l'on connaît les caractéristiques d'une serre commerciale et de celles des sites choisis, on peut passer au chapitre suivant qui portera sur la modélisation de l'ensemble de ces caractéristiques.

### 3. MODÈLE

Le présent chapitre traite de la modélisation mathématique du comportement thermique dynamique d'une serre commerciale. On posera, tout d'abord, les hypothèses simplificatrices à partir desquelles on établira le modèle mathématique. Par la suite, on expliquera plus en profondeur les parties stratégiques du modèle pour, finalement, présenter le schéma de programmation qui sera exécuté par le logiciel commercial TRNSYS.

#### 3.1 Hypothèses simplificatrices

Lors de la création d'un modèle, il est d'usage de réduire le plus possible la complexité des équations, de même, que le temps de calcul des simulations. Pour se faire on basera le modèle mathématique d'une serre commerciale, du présent projet de recherche, sur les hypothèses simplificatrices suivantes.

- La serre est représentée par 2 zones: la zone de culture (rez-de-chaussée) et celle de l'entre-toit dont la délimitation se retrouve au niveau de la toile thermique.
- La température et l'humidité sont uniformes dans chacune des zones. On peut donc représenter un gradient thermique et d'humidité entre le niveau des plantes et celui du toit et cela, qu'il y ait ou non la présence d'une toile thermique.
- Le sol est représenté par un mur épais possédant le même coefficient de transfert de chaleur et les mêmes propriétés physiques qu'un sol réel. Par contre, les propriétés ne peuvent varier dans le temps.
- L'ensemble des plantes est représenté par un mur interne suspendu au-dessus du plancher.
- Les facteurs de forme pour les échanges radiatifs sont considérés constants malgré la croissance des plantes.
- On simulera 2 récoltes par année: les récoltes hâtives (1<sup>er</sup> janvier au 30 juin; 1<sup>er</sup> juillet au 31 décembre), ou bien, les récoltes tardives (15 mars au 31 juillet; 1<sup>er</sup> août au 15 décembre).

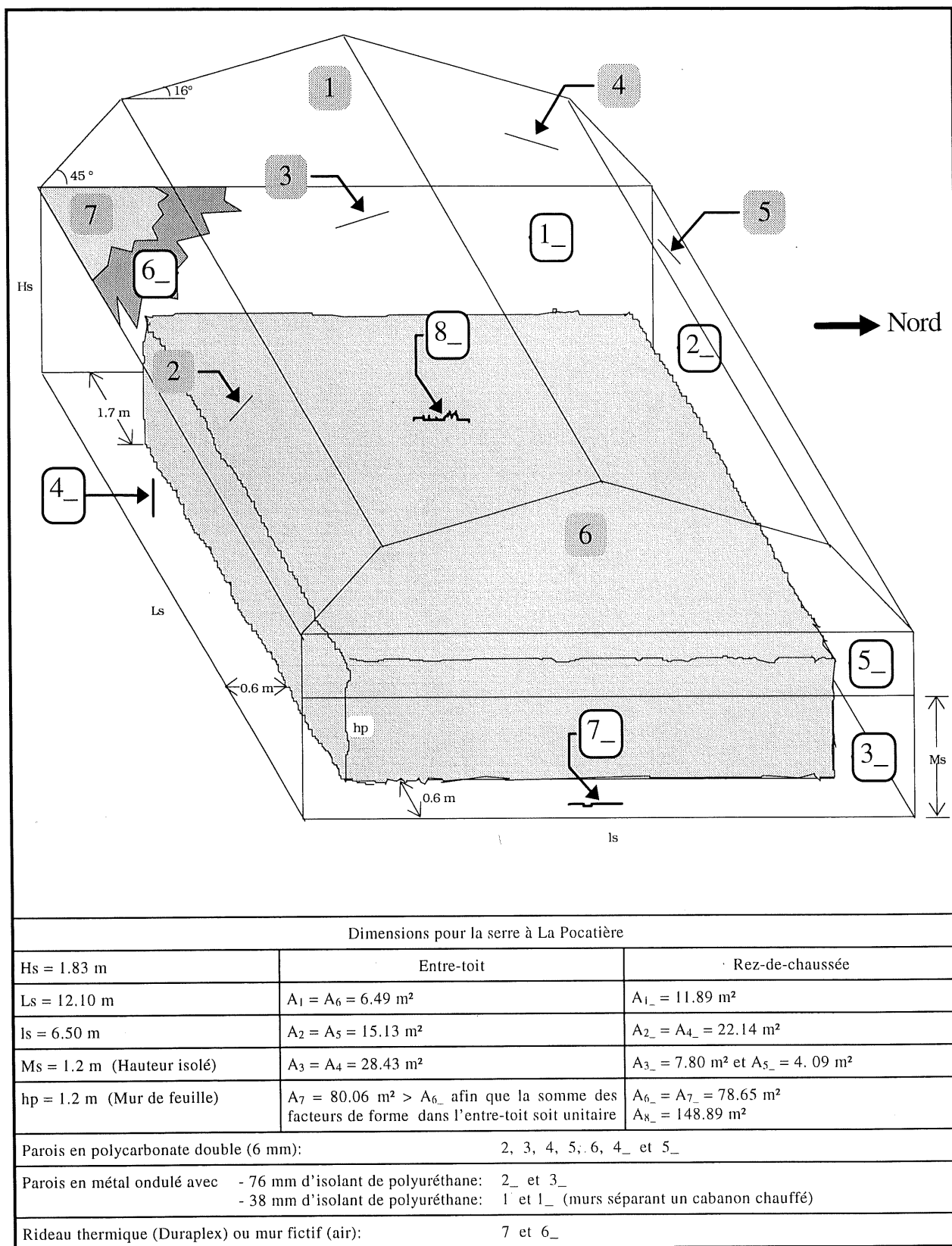
- La condensation est considérée uniforme sur toutes les parois transparentes d'une même zone.
- La convection à la surface interne des murs et des vitrages est considérée constante ( $h_{c,i} = 8.29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), de même que pour le plancher ( $h_{c,7} = 7.7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) [23].

On retrouvera, dans les sections qui suivent, des explications plus détaillées sur les hypothèses que l'on vient d'énumérer.

### 3.2 Modélisation mathématique

Le modèle mathématique que l'on utilisera pour représenter une serre est un bilan énergétique calculé entre 4 types de noeud (points de calcul) [28]. Un noeud correspond à un endroit où une température est connue ou doit être déterminée. L'environnement extérieur constitue un type de noeud, alors que l'intérieur de la zone en représente un autre. Une zone adjacente à la zone étudiée constitue également un autre type de noeud. Le sous-sol est aussi représenté par ce dernier type de noeud (zone adjacente). Finalement, chacune des surfaces internes des murs constituent des noeuds distincts dont on doit connaître la température pour en évaluer les échanges radiatifs.

La figure 3.1 illustre chacune des surfaces de la serre qui seront utilisées dans le modèle.



**Figure 3.1** Surfaces constituant le rez-de-chaussée □ et l'entre-toit ■ du modèle de la serre



Dans ce modèle physique, les équations du bilan énergétique régissant le comportement thermique de la serre, pour chaque pas de temps, sont les suivantes:

**pour le rez-de-chaussée**

$$\underbrace{\dot{Q}_{\text{sens}}}_a = \underbrace{\dot{Q}_z}_b + \underbrace{\dot{Q}_v}_c + \underbrace{\dot{Q}_{\text{int}}}_d + \underbrace{0.3\dot{Q}_{\text{spepl}} + \dot{Q}_{\text{infl}}}_e + \underbrace{\sum_{i=1}^N h_{c,i} A_i (T_{s,i} - T_z)}_g - \underbrace{\text{Cap} \frac{(T_{ZF} - T_{ZI})}{\Delta t}}_h \quad (3.1)$$

**et pour l'entre-toit**

$$\dot{Q}_{\text{sens}} = \dot{Q}_z + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{\text{int}} + \dot{Q}_{\text{infl}} + \sum_{i=1}^M h_{c,i} A_i (T_{s,i} - T_z) - \text{Cap} \frac{(T_{ZF} - T_{ZI})}{\Delta t} \quad (3.2)$$

On remarque que le bilan énergétique d'une serre dépend de beaucoup de paramètres qui sont définis ci-dessous:

- a)  $\dot{Q}_{\text{sens}}$  représente l'énergie sensible qu'il faut ajouter ou enlever à la zone pour maintenir la température au niveau désiré.
- b)  $\dot{Q}_z$  constitue l'échange de chaleur à travers le ou les murs qui séparent la zone étudiée d'une zone adjacente à celle-ci. Dans le présent modèle, la zone adjacente peut représenter une salle de contrôle (dans laquelle la température et l'humidité sont à des niveaux plus adéquats pour l'équipement électronique et certains produits entreposés), le sous-sol ou encore, l'entre-toit par rapport au rez-de-chaussée.
- c)  $\dot{Q}_v$  désigne l'échange de chaleur qui est occasionné par la ventilation mécanique entre l'intérieur du rez-de-chaussée et l'extérieur. Il représente, également, les échanges d'air qu'il y a entre les 2 zones ( $\dot{M}_{\text{convec.}}$ ). Ces échanges peuvent être dus à la convection naturelle, ou bien, à la ventilation mécanique qui fait entrer l'air frais par le rez-de-chaussée et fait ressortir l'air vicié par des trappes sur le toit.

$$\dot{Q}_{va} = \dot{M}_{va} c_{pa} (T_a - T_{z\text{rez}}) \quad \text{(air provenant de l'extérieur par la ventilation forcée)} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{v\text{convec.}} = \dot{M}_{\text{convec.}} c_{p\text{toit}} (T_{z\text{toit}} - T_{z\text{rez}}) \quad \text{(air frais qui redescend de l'entre-toit vers le rez-de-chaussée, poussé par l'air chaud qui monte)} \quad (3.4)$$

où  $c_p$  est la capacité thermique de l'air selon sa provenance.

- d)  $\dot{Q}_{int}$  représente les gains internes, c'est-à-dire, les gains de chaleur sensible provenant principalement des moteurs des ventilateurs d'aération et de recirculation. Ces gains comprennent également la chaleur dégagée par les ballasts (transformateurs) des lampes au sodium à haute pression (HPS).
- e)  $\dot{Q}_{pepl}$  constitue les gains en chaleur sensible générés par les personnes et qui sont transmis au rez-de-chaussée de 2 façons: 30 % sous forme de convection naturelle et le reste est transmis aux surfaces intérieures par radiation (défini plus loin dans le texte) [28].
- f)  $\dot{Q}_{infl}$  désigne les pertes ou les gains de chaleur occasionnés par les infiltrations qui dépendent de 3 facteurs: l'étanchéité naturelle du bâtiment ( $K_1$ ), la poussée d'Archimède ( $K_2$ ) et la pression dynamique ( $K_3$ ). Ces coefficients sont reliés par l'équation (3.6) et les valeurs typiques pour chacun d'eux sont données dans le tableau B.1 à l'annexe B:

$$\dot{Q}_{infl} = \dot{M}_{infl} C_{pa} (T_a - T_z) \quad (3.5)$$

$$\text{où } \dot{M}_{infl} = \rho_a V_a (K_1 + K_2 |T_a - T_z| + K_3 W) \quad (3.6)$$

$\rho_a$  est la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_a$  est le volume de la zone ( $\text{m}^3$ )

$W$  est la vitesse du vent ( $\text{m/s}^2$ ).

- g)  $\sum_{i=1}^N h_{c,i} A_i (T_{s,i} - T_z)$  représente les échanges thermiques entre l'intérieur de la zone et l'environnement extérieur aux parois. Elle est fonction de 3 types d'échange thermique: la convection interne et externe, la conduction et les échanges radiatifs. La convection et la conduction à travers un mur peuvent être représentées par la fonction de transfert suivante [28, 30]:

$$\dot{q}_i = \sum_{h=0} b_{h,i} T_{sai,h} - \sum_{h=0} c_{h,i} T_{eq,i,h} - \sum_{h=1} d_{h,i} \dot{q}_{i,h} \quad (3.7)$$

$$T_{sai} = T_a + \frac{(\alpha I_r)_i}{h_{c,o}} \quad (3.8)$$

$$\text{où } h_{c,o} = 5.7 + 3.8 \cdot \text{Vent}(\text{m/s}) \quad (\text{kJ/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T_{eq,i} = T_z + \frac{S_i + \sum_{j=1}^N h_{r,j} (T_{s,j} - T_{s,i})}{h_{c,i}} \quad (3.9)$$

Cette fonction de transfert prend en considération la disposition des éléments qui composent le mur, sa résistance et sa capacité thermique. Mise sous cette forme, l'équation (3.7) tient également compte des gains et des échanges radiatifs. En effet, le terme  $T_{sa,i}$  est définie comme étant la température sol-air de la surface extérieure (équation (3.8)). Cela signifie que, durant le jour, cette température engendre le même transfert de chaleur avec l'air extérieur ( $h_{c,o}$ ) que s'il n'y avait pas de rayonnement solaire absorbé par la paroi  $i$  ( $\alpha I_T$ )<sub>i</sub>. De cette façon, on n'a pas besoin d'inclure le rayonnement dans l'équation (3.7). C'est le même principe pour la surface interne ( $T_{eq,i}$ ), équation (3.9). Mais cette fois-ci, on doit tenir compte des échanges radiatifs (infrarouges longs seulement) entre les surfaces ( $\sum_{j=1}^N h_{r,j,i} (T_{s,j} - T_{s,i})$ ). Le terme  $s_i$  représente les gains de rayonnement en provenance du soleil, des lumières, des équipements et des personnes.

Les termes  $b_h$ ,  $c_h$  et  $d_h$  sont les coefficients de la fonction de transfert pour le mur considéré. On retrouve des valeurs typiques pour un mur de serre isolé dans le tableau B.2 à l'annexe B. L'indice  $h$  signifie le temps présent s'il vaut 0 et le temps passé lorsqu'il vaut 1.

Par contre, dans le cas du fenêtrage, on ne tient pas compte de sa capacité thermique. L'équation (3.7) devient:

$$\dot{q}_i = U_i (T_{sa,i} - T_{eq,i})^1 \quad (3.10)$$

- h)  $\text{Cap} \frac{(T_{ZF} - T_{ZI})}{\Delta t}$  est la capacité thermique de l'intérieur de la serre. Cette dernière retarde, dans le temps, les variations thermiques de la zone. Le terme Cap représente la capacitance de l'intérieur de la zone. C'est-à-dire, tout ce qui constitue une masse (l'air, les équipements, l'ameublement et les poutres qui ne font pas partie des murs internes ou externes [déjà inclus dans la fonction de transfert de l'équation (3.7)]).

Dans les sections qui suivent, on retrouvera des explications plus détaillées sur les termes des équations du bilan d'énergie.

---

<sup>1</sup>L'équation (3.8) a dû être ajoutée dans le DECK du logiciel commercial TRNSYS pour qu'il puisse tenir compte de l'absorptivité solaire du fenêtrage. De plus, on a ajouté le terme  $h_{c,o}$  à la conductance du fenêtrage pour qu'elle puisse varier en fonction du vent

### 3.2.1 Modélisation des pertes dans le sol

Parmi toutes les surfaces qui constituent un bâtiment fermé, les pertes par les fondations sont certainement celles qui sont les plus difficiles à calculer avec une bonne précision. Les propriétés non constantes du sol (pourcentage d'eau, gel et dégel, etc.) en sont la première raison, alors que la grande variation temporelle de la température selon la profondeur complique également la représentation.

Le TYPE 19 (modélisation d'un bâtiment) du logiciel commercial TRNSYS, ne permet pas de représenter les fondations. Par contre, grâce aux fonctions de transfert décrites à l'équation (3.7), on peut simuler le sol par l'utilisation d'un mur épais ayant les mêmes propriétés que le sol. Mais, lorsqu'un mur massif dépasse 0.3 à 0.4 m d'épaisseur, les fonctions de transfert ont tendance à diverger; la variation temporelle de la température devient trop importante. De toute façon, comme on le verra plus loin, il n'est pas nécessaire de représenter une grande épaisseur de sol. En effet, selon Takakura et al. [31], la chaleur diffuse d'environ 0.2 m par 12 heures dans le sol. Les variations cycliques journalières de la température à la surface du sol n'ont donc pas une grande influence au-delà de 0.2 m de profondeur.

L'objectif de la simplification est de représenter la conduction axiale et latérale des fondations en une conduction uniquement axiale à travers un mur, tel que représenté sur la figure 3.2.

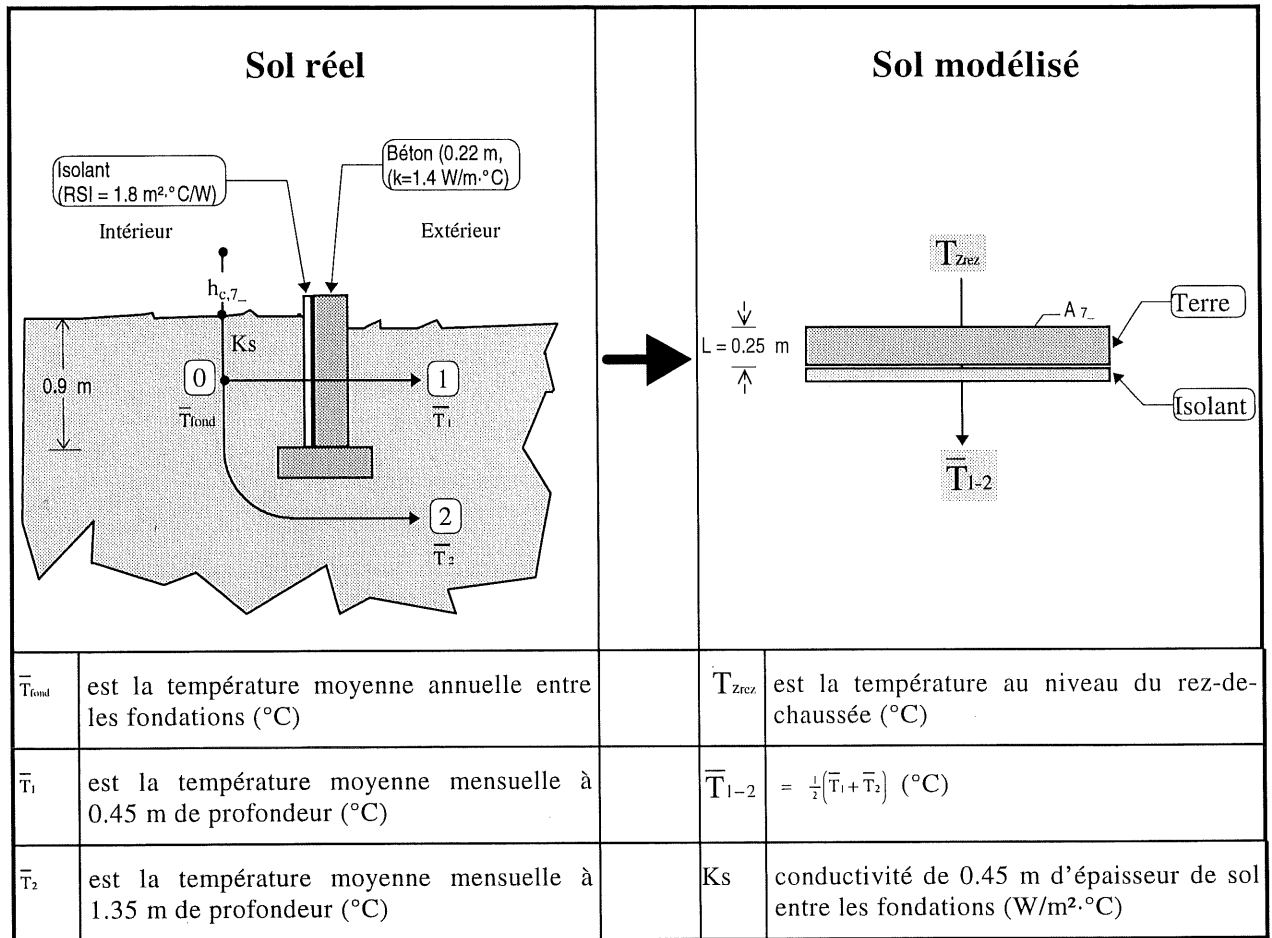


Figure 3.2 Utilisation d'un mur pour modéliser les pertes dans le sol

Dans ce modèle, il faut que le mur ait la même conductance et le même comportement thermique que la fondation réelle. Pour ce faire, on choisit une épaisseur de terre de 0.25 m, afin de pouvoir simuler les variations horaires de la température dans le sol. Beaucoup plus en profondeur, on utilise  $\bar{T}_{1-2}$  pour simuler les variations mensuelles. Par la suite, on ajoute un isolant afin de représenter la résistance thermique manquante. Mais pour déterminer cette résistance manquante, il faut connaître la conductance totale. Selon la figure (3.1) et en négligeant les pertes par la fondation ouest (présence d'un cabanon chauffé indépendamment de la serre), on trouve, d'après les tables de pertes de chaleur au niveau des fondations de l'ASHRAE [23] et d'Akridge [32], que les déperditions thermiques entre le point 0 et les points 1 et 2 sont:

$$\dot{Q}_{0-1} = 9.33 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{Q}_{0-2} = 14.8 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

Convertissons ces 2 conductances en une seule conductance et en fonction de la surface du plancher ( $A_{7\_}$ ), par la relation suivante:

$$\bar{U}_{\text{fond}} = \frac{\dot{Q}_{0-1} (\bar{T}_{\text{fond}} - \bar{T}_1) + \dot{Q}_{0-2} (\bar{T}_{\text{fond}} - \bar{T}_2)}{A_{7\_} (\bar{T}_{\text{fond}} - \bar{T}_{1-2})} \quad (3.11)$$

Le tableau 3.1 montre que  $\bar{U}_{\text{fond}}$  varie peu selon de la température entre les fondations et celle à l'extérieur dans le sol. Par conséquent, la valeur de  $0.306 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$  peut représenter une conductance annuelle raisonnable des fondations de la serre considérée.

TABLEAU 3.1 CONDUCTANCE MOYENNE DES FONDATIONS SELON LA TEMPÉRATURE DU SOL À LA POCATIÈRE [14, 33, 34, 35]

	Température dans le sol ( $^{\circ}\text{C}$ )					$\bar{U}_{\text{fond}}$ ( $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )		
	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_{1-2}$					
Profondeur	0.45 m	1.35 m	0.9 m		$\bar{T}_{\text{fond}}$	0 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$
Jour					$\bar{T}_{1-2}$			
0	1.48	4.71	3.10		3.10	0.343	0.300	0.304
17	0.90	3.95	2.43		2.43	0.351	0.301	0.304
47	0.35	2.91	1.63		1.63	0.361	0.302	0.304
75	0.32	2.37	1.34		1.34	0.360	0.303	0.305
105	1.47	2.29	1.88		1.88	0.322	0.305	0.306
135	6.77	4.28	5.52		5.52	0.291	0.313	0.309
162	12.53	7.97	10.25		10.25	0.291	0.323	0.312
198	16.27	11.46	13.86		13.86	0.295	0.334	0.313
228	16.45	13.14	14.80		14.80	0.299	0.329	0.311
258	14.12	12.97	13.54		13.54	0.304	0.313	0.308
288	9.87	11.14	10.50		10.50	0.311	0.302	0.305
318	5.18	8.24	6.71		6.71	0.323	0.299	0.304
344	2.20	5.65	3.93		3.93	0.337	0.299	0.303
365	1.48	4.71	3.10		3.10	0.343	0.300	0.304
Moy. =	6.76	7.01	6.88		Moy. =	0.308	0.306	0.307

Maintenant, on peut déterminer la conductance moyenne globale du plancher par la relation suivante (en se référant à la figure 3.2):

$$\bar{U}_{\text{plancher}} = \frac{1}{1/h_{c,7-} + 1/K_s + 1/\bar{U}_{\text{fond}}} = \frac{1}{1/h_{c,7} + 1/U_{\text{terre}}} = 0.253 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C} \quad (3.12)$$

$$= 0.272 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C} \text{ (selon } h_{c,7})$$

où  $h_{c,7-} = 2.47 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  ( $7.7 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  avec la composante radiative  
[voir la note à l'annexe B, tableau B.2])

$$K_s = 3.64 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{U}_{\text{fond}} = 0.306 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$U_{\text{terre}} = 0.282 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$$

Finalement, on peut déterminer la résistance manquante qui constitue l'isolant du mur-plancher. Le tableau 3.2 donne les caractéristiques du mur qui simulera les pertes par les fondations.

TABLEAU 3.2 COMPOSITION DU MUR QUI SIMULERA LES PERTES THERMIQUES PAR LE PLANCHER [3, 23]

	Mur de terre	Isolant de polyuréthane
<b>L</b> (m)	0.25	0.0836
<b>k</b> (W/m·°C)	1.635	0.0245
<b>ρ</b> (kg/m <sup>3</sup> )	1538	24
<b>c<sub>p</sub></b> (kJ/kg·°C)	1.29	1.59
<b>R</b> (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.153 (R <sub>terre</sub> = 0.25 m / 1.635 W/m·°C)	3.4 (R <sub>isolant</sub> = voir ci-dessous)
<b>U<sub>terre</sub></b> (W/m <sup>2</sup> ·K)	$U_{\text{terre}} = 0.282 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C} = \frac{1}{R_{\text{terre}} + R_{\text{isolant}}} \rightarrow R_{\text{isolant}}$	

On retrouvera, dans le tableau B.3 à l'annexe B, les coefficients de la fonction de transfert de ce mur.

### 3.2.2 Modélisation du mur de plantes

La modélisation des plantes peut s'avérer une tâche très ardue. Par contre, on peut représenter toute une culture par un seul mur possédant certaines propriétés thermiques et optiques. Mais, il est assez difficile de trouver ce genre de données sur une culture particulière telle que la culture du plant de tomates. En utilisant plusieurs références, on peut en arriver à modéliser la croissance complète d'un plant de tomates. La figure 3.3 montre cette croissance à partir de la transplantation en terre des jeunes plants.

La hauteur maximale atteinte par les plants de tomates est celle du rez-de-chaussée, mais sans dépasser 2.1 m pour qu'ils demeurent toujours accessibles aux serriculteurs [36]. Par contre, la tige peut atteindre une longueur beaucoup plus grande, comme le montre la figure 3.3 pour 2 plantations par année. Dans ce cas, on fait tout simplement redescendre la tige vers le sol et on la remonte de nouveau si ce n'est pas suffisant. Globalement, la densité de plantation varie entre 2.5 à 3.75 plants/m<sup>2</sup>, selon l'espèce cultivée et le nombre désiré de grappes par plant [21].

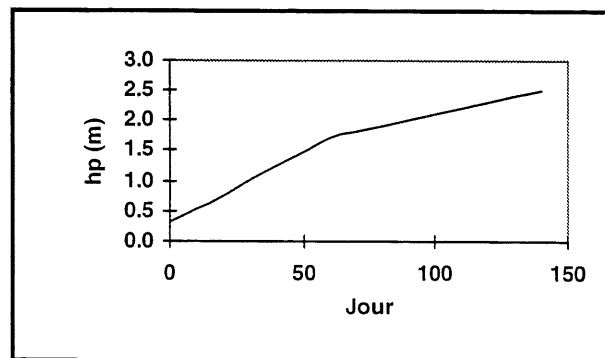


Figure 3.3 Croissance d'un plant de tomates  
(hauteur à partir de la transplantation)  
[18, 21, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]

Selon le modèle de serre à la figure 3.1, les dimensions du mur 8\_ varient en fonction de la croissance des plants de tomates. Par conséquent, la valeur des facteurs de forme, qui servent à calculer les échanges radiatifs entre les murs, change continuellement. Le problème



que cela engendre est que les facteurs de forme ( $F_{i,j}$ ) entrent dans la catégorie «PARAMETERS» du logiciel TRNSYS. Dans cette catégorie, les valeurs demeurent constantes tout au long de la simulation et ne peuvent être modifiées comme les «INPUTS» peuvent l'être.

L'influence de la hauteur des plants de tomates sur les facteurs de forme est surtout importante pour les échanges radiatifs avec le mur sud et le mur nord (si ce dernier n'est pas isolé). En effet, les parois du toit convergent principalement vers les plantes ou le plancher. Pour cette raison, que les plantes soient hautes ou non, la quantité de rayonnement échangé avec elles ne varie pas beaucoup, surtout si la surface de culture est grande par rapport à celle des murs.

En calculant le «potentiel d'échanges radiatifs» entre les surfaces chaudes ( $1_{-}$ ,  $2_{-}$ ,  $3_{-}$ ,  $7_{-}$  et  $8_{-}$ ) et la surface froide  $4_{-}$ , mais en fonction de la hauteur des plants, on trouve qu'une hauteur de 1.2 m du mur  $8_{-}$  peut représenter un bon compromis (voir tableau 3.3). Avec cette valeur, on obtient une erreur maximale d'environ 20 % lorsque l'on simule une serre sans plantes, ou bien, quand ces dernières atteignent la hauteur de l'entre-toit (1.83 m dans cet exemple).

TABLEAU 3.3 INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU MUR DE PLANTS DE TOMATES SUR LES ÉCHANGES RADIATIFS

$h_{8_{-}}$ (m)	$\Sigma F_{4_{-},i}$	Variation (%)	$\Sigma A_i \cdot F_{i,4}$ (m <sup>2</sup> )	Variation (%)
	L'influence du milieu sur le mur $4_{-}$		L'importance du mur $4_{-}$ dans le milieu	
0	0.593	référence	13.12	référence
1.20	0.740	25	16.31	24
1.83	0.838	41	18.62	42

Par contre, on ne rencontre pas cette imprécision avec la distribution du rayonnement solaire sur les surfaces internes. En effet, ce sont des variables dans la catégorie «INPUTS» qui contrôlent la fraction du rayonnement direct du soleil qui frappe chacune des surfaces internes de la serre. Dans ce cas, si on veut obtenir une distribution réaliste, il faut connaître les propriétés optiques d'une culture de plants de tomates. Les coefficients de réflexion, de transmission et d'absorption lumineuse d'une culture de tomates sont:

$$\rho_p \approx 0.26 \quad [45, 46]$$

$$\tau_p \approx 0.25 + 0.75 e^{-2.73 f_p} \quad \text{où } f_p = h_p/h_{p_{\max}} \quad [36, 38, 44, 47]$$

$$\alpha_p \approx (1 - \tau_p) (1 - \rho_p)$$

Finalement, il faut noter que le mur 8\_ constitue un bloc avec 6 côtés, comparativement aux autres parois qui n'ont qu'un seul côté interne. Généralement, la surface fictive  $A_{8\_}$  est beaucoup plus petite que celle de l'ensemble du feuillage réel. Mais cela n'affecte pas la quantité de rayonnement solaire absorbée par le mur de plantes. On tiendra quand même compte de la surface réelle dans le calcul de l'évapotranspiration.

### 3.2.3 Évapotranspiration

Le jour, les plantes sont continuellement exposées au soleil. Elles doivent donc posséder un système de régulation de la température pour éviter qu'elles ne surchauffent et ne s'assèchent. Ce système s'appelle évapotranspiration. La feuille libère de l'eau à sa surface pour qu'elle puisse s'évaporer en absorbant la chaleur de la feuille.

L'évapotranspiration est principalement fonction du rayonnement lumineux reçu ( $\dot{S}_{8\_}$ ), des échanges radiatifs ( $\dot{Q}_{r,i}$ ) et dans une moindre mesure de la température de l'air, de l'humidité relative et du vent [40, 44, 48, 49].

Du point de vue microscopique, le métabolisme qui régularise la transpiration est très complexe et indépendant d'une feuille à l'autre (selon son âge, la lumière reçue, la température de l'air chaud du système de chauffage, etc.). Mais du point de vue macroscopique, la modélisation devient plus simple à mettre en oeuvre. En effet, le but d'une plante est de maintenir sa température au niveau de celle de l'air ambiant et même un peu en dessous de celui-ci. Plusieurs études expérimentales ont démontré que, pour une humidité relative inférieure à 85 %,  $T_{\text{air}} > 10 \text{ °C}$  et  $I < 600 \text{ W/m}^2$ , la température des feuilles est divisée en 2 catégories [38, 44, 47, 50]:

Jeunes feuilles:  $T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}} \approx -1.5 \text{ °C}$

Vieilles feuilles:  $-1.1 < T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}} < +3 \text{ °C}$  (selon  $\dot{S}_{8\_}$  et  $\dot{Q}_{r,8}$ ).

Étant donné que l'on retrouve beaucoup moins de vieilles feuilles que de jeunes (culture bien entretenue), on peut supposer que la température réelle du mur de plantes est en moyenne  $0.75 \text{ °C}$  inférieure à la température ambiante.

Dans notre modèle (le code lu par TRNSYS que l'on appelle DECK), on a défini le mur 8\_ comme étant un «NON-ASHRAE WALL (CONDUCTION INPUT)». Ce mur a pour particularité que l'on peut lui enlever ou ajouter de l'énergie à volonté. Dans le cas d'un mur de plantes, c'est surtout un retrait d'énergie que l'on devra appliquer. Ce retrait se calcule en tout temps par l'équation suivante [44]:

$$\dot{Q}_{\text{feuille}} = -\left[ LA I_{\text{max}} (hp / hp_{\text{max}}) \right] \left( \alpha_l \dot{S}_{8\_} + \alpha_r \text{MAX}(\dot{Q}_{r,8\_}, 0) \right) + \dot{Q}_{C\text{feuille}} \quad (3.13)$$

où  $LA I_{\text{max}} = 3 \text{ m}^2 \text{ feuilles/m}^2 \text{ plancher}$  (sur 1 côté de feuille)

$hp_{\text{max}} = \text{longueur maximale du plant de tomates (m)}$

$\alpha_l = 0.14 = \text{coefficient d'absorption du rayonnement lumineux}$

$\dot{S}_{8\_} = \text{rayonnement: solaire, éclairage artificiel (W)}$

$\alpha_r = 0.16 = \text{coefficient d'absorption des infrarouges longs}$

$\dot{Q}_{r,8\_} = \text{gains ou pertes radiatives (infrarouges longs) du mur 8_ (W)}$

$$\dot{Q}_{\text{feuille}} = [2 LA I_{\text{max}} (h_p / h_{p_{\text{max}}})] A_{7\_} h_{\text{feuille}} (-0.75^\circ\text{C}) = \text{convection (W)} \quad (3.14)$$

où  $A_{7\_}$  = surface du plancher ( $\text{m}^2$ )

$$h_{\text{feuille}} = 4.7 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$$

L'équation (3.13) donne des valeurs toujours négatives. Alors, pour maintenir la température à  $-0.75^\circ\text{C}$  sous celle de l'air de la zone, il faut évaporer une quantité d'eau équivalente à:

$$\dot{M}_{\text{évap}} = \frac{|\dot{Q}_{\text{feuille}}|}{h_{\text{vapo.}}} \quad (3.15)$$

$$\text{où } h_{\text{vapo.}} = 2454 \text{ kJ/kg d'eau (T = } 20^\circ\text{C)}$$

Par contre, si les pertes radiatives  $\dot{Q}_{r.s.}$  sont suffisantes pour maintenir la température à  $-0.75^\circ\text{C}$ , il n'est pas nécessaire d'évaporer de l'eau. Mais, on pose quand même une transpiration minimale que l'on a établie à  $\dot{Q}_{\text{feuille}}$  (transpiration de nuit), car les feuilles ne sont pas parfaitement étanches au passage de l'eau.

Cette eau doit être transférée à l'air ambiant sous forme de gain d'humidité. De plus, le système d'arrosage doit fournir un débit équivalent à l'eau évaporée. Par contre, on néglige l'eau que le sol absorbe naturellement en considérant l'emploi d'un système d'irrigation efficace (près des tiges). De toute façon, le sol n'absorbe pas toujours l'eau, il en régurgite parfois comme c'est le cas au printemps ou après de fortes pluies. D'un autre côté, on tiendra compte de l'évaporation à la surface du sol, comme on le verra à la prochaine section.

L'eau provient généralement d'un puits dont la température est de l'ordre de  $4^\circ\text{C}$ . Idéalement, elle est tempérée dans un bassin avant d'être distribuée aux plantes. Cela signifie que l'on doit chauffer davantage la serre pour être en mesure d'accroître la température de l'eau. Il faut donc soustraire, au terme  $\dot{Q}_{\text{int}}$  de l'équation (3.1), l'énergie sensible suivante:

$$\dot{Q}_{\text{int}} = + \dots - \dot{M}_{\text{évap (feuilles + sol)}} C_{p_{\text{eau}}} (T_{\text{zrc}} - 4^\circ\text{C}) \quad (3.16)$$

$$\text{où } C_{p_{\text{eau}}} = 4.2 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

### 3.2.4 Condensation sur le fenêtrage interne de la serre

La plupart des revêtements transparents offrent une faible résistance thermique. Par conséquent, la surface interne de la fenestration a souvent une température inférieure à celle du point de rosée. Inévitablement, en saison froide ou pendant les nuits fraîches de l'été, il y a beaucoup d'humidité qui se condense sur ces surfaces.

Le principal inconvénient est que la condensation augmente les pertes thermiques des parois (voir tableau 3.4). De plus, elle tendrait à réduire la transmission lumineuse du recouvrement. Mais, ce ne sont pas tous les auteurs qui s'entendent sur ce point. Certains prétendent que l'effet est négligeable, alors que d'autres mesurent une réduction jusqu'à 6 %. Ce qui est certain, c'est que le film de condensé transforme le rayonnement direct du soleil en un rayonnement plus diffus qui donne une meilleure distribution de la lumière dans la serre, mais qui est mesuré différemment. Dans un tel cas, il faut être vigilant dans le choix et la disposition des appareils qui mesurent l'intensité lumineuse et qui sont utilisés par les différents auteurs; les résultats peuvent en dépendre. Mais, on peut supposer que s'il y avait 6 % de moins de rayonnements qui entrent, il y en aurait également 6 % de moins qui ressortiraient de la serre après avoir été réfléchis ou en passant directement d'une paroi à l'autre. Par conséquent, dans notre modèle, on n'utilise aucune réduction de la transmission lumineuse, mais on opte pour une augmentation maximale de 12 % de la conductance. Cette augmentation est fonction du taux de condensation, comme on le verra un peu plus loin dans cette section.

Par contre, la buée sur les parois apporte 2 avantages. Le premier avantage est qu'elle tend à réduire les excès d'humidité (jusqu'à 10 % [22]). Le second avantage est qu'elle contribue à diminuer les pertes thermiques radiatives à travers le polyéthylène (voir tableaux 2.1 et 3.4). Mais, pour le verre ou le polycarbonate, cela a peu d'effet puisqu'ils offrent déjà une faible transmission aux rayonnements infrarouges longs. Dans tous les cas, lorsqu'il y a

TABLEAU 3.4 PROPRIÉTÉS OPTIQUES ET THERMIQUES DES RECOUVREMENTS DE SERRE AVEC OU SANS CONDENSATION

Recouvrement	Transmission ( $\tau$ )	Émissivité apparente ( $\epsilon$ )	Conductance ( $U$ en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	Références
Polyéthylène simple (0.2 mm)	$\tau_{sec} = 0.82$ $\tau_{buée} = 0.81$	$\epsilon_{sec} = 0.55$ $\epsilon_{buée} = 1$	$U_{buée} = U_{sec} + 28 \%^i$ $6.1 = 4.8 + 28 \%$	[17, 11]
---	$\tau_{sec} = \tau_{buée} + 6 \%$ maximum	---	---	[51]
Polyéthylène double	---	$\epsilon_{sec} = 0.16$ $\epsilon_{buée} = 0.95$	---	[52]
	---	$\epsilon_{sec} = 0.6$ $\epsilon_{buée} = 0.96$	$U_{buée} = U_{sec} + 11.7 \%^{ii}$ $U_{max}$	[11]
	---	---	$U_{0.5 \text{ m/s}} + 2.1 \% = U_{0.8}^{iii}$ $U_{0.5} + 10.6 \% = U_{1.6}$	[11]

<sup>i</sup> Valeurs approximatives.

<sup>ii</sup> Valeurs expérimentales obtenues en laboratoire pour un taux de condensation moyen de 110 mL/h·m<sup>2</sup> (0.11 kg/h·m<sup>2</sup>).

<sup>iii</sup> Le chiffre en indice représente la vitesse de l'écoulement de l'air sur la paroi.

condensation, il est raisonnable de fixer une transmission nulle au rayonnement thermique. La seule imprécision vient du polyéthylène qui n'est pas recouvert d'une buée. Dans ce cas, l'opacité n'est que de 55 à 60 %. Dans le présent modèle, on considère une opacité de 100 % dans tous les cas, soit la valeur par défaut de TRNSYS. La raison est que le TYPE 19 de TRNSYS ne permet pas de modifier la valeur d'opacité. De toute façon, le seul moment où il n'y a pas de buée sur un revêtement de serre (dont l'humidité est très élevée à l'intérieur), c'est quand la température externe est relativement élevée. Pendant ces périodes, la demande en chauffage est généralement faible et l'erreur produite par cette opacité fixée à 100 % a peu d'impact sur un bilan énergétique annuel.

Calculons maintenant le taux de condensation sur les parois ( $\dot{M}_{cond,i}$ ) dans le but d'y enlever une même quantité d'eau dans l'air de la serre et d'y faire varier la conductance du fenêtrage. Ce taux est calculé par l'équation suivante [10, 53]:

$$\dot{M}_{cond,i} = A_i H_D (w_z - w_{s,i}) \text{ si } w_z > w_{s,i} \quad (3.17)$$

$$\text{où } H_D = \frac{h_{c,i} L_e^{0.67}}{c_{pa}} \approx 0.0033 \text{ à } 0.008 \text{ (kg d'air /m}^2\cdot\text{s)}$$

$h_{c,i}$  = coefficient de convection interne (8.29 W/m<sup>2</sup>.°C)

$c_{pa}$  = capacité thermique de l'air (1021 J/kg.°C)

$L_e$  = Nombre de Lewis pour l'eau (0.89)

$w_z$  = humidité absolue de l'air dans la zone (kg d'eau /kg d'air) à  $T_z$

$w_{s,i}$  = humidité absolue de l'air à la paroi (kg d'eau /kg d'air) à  $T_{s,i}$

$A_i$  = surface du fenêtrage  $i$  (m<sup>2</sup>)

Selon Delwiche et Willits [11], la condensation augmente la conductance d'une paroi ( $U_i$ ) en fonction de 2 facteurs principalement: le taux de condensation et la vitesse de l'écoulement de l'air au niveau interne du recouvrement. Le tableau 3.4 montre que les vitesses d'écoulement inférieures à 0.8 m/s n'ont pas une très grande influence sur la conductance d'une paroi. Puisque dans une serre, avec ou sans recirculation forcée, l'air se déplace normalement à une vitesse inférieure à 0.7 m/s [47] (l'optimum est à 0.2 m/s [12]), alors, il est acceptable de négliger la composante de vitesse dans la fonction de  $U_i$ . Par contre, on note que  $U_{buée} \approx U_{sec} + 12 \%$  et cela peu importe le type de fenêtrage. De plus, Delwiche et Willits ont démontré que  $U_i$  est une fonction linéaire de  $\dot{M}_{cond,i}$ . Donc, on établit  $U_{buée}$  de la façon suivante:

$$U_{buée,j} = U_{sec,j} \left( 1 + 0.12 \frac{\dot{M}_{cond,j}}{\dot{M}_{cond,max}} \right) \quad (3.18)$$

$$\text{où } \dot{M}_{cond,max} = A_i \cdot 0.11 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2 \text{ à } v = 0.5 \text{ m/s}$$

Comme on l'a spécifié dans les hypothèses de la section 3.1, on n'utilise qu'une seule surface de référence par zone pour le calcul de la condensation. C'est une raison d'économie de variables qui nous force à faire cette restriction. En effet, TRNSYS ne permet de déclarer que 100 variables dans le code personnalisé (DECK). En se référant à la figue 3.1, la

surface  $i$  la plus représentative pour le toit (selon  $T_{s,i}$ ) est le fenêtrage 4 et pour le rez-de-chaussée, c'est le fenêtrage 4\_. Ce sont des simulations qui ont permis de trouver les parois qui donnaient une température de surface interne la plus proche de la valeur moyenne de chaque zone. De plus, on a noté qu'il y a peu d'écart de température entre les différentes surfaces d'une même zone ( $< 2.2$  % sur une moyenne annuelle).

Pour l'évaporation du sol, c'est la même forme d'équation que (3.17), sauf que l'on remplace  $H_D$  par  $E_c = 0.0004$  kg d'air /m<sup>2</sup>.s. Finalement, on enlève de l'air de la serre, l'eau qui s'est condensée et on ajoute celle qui s'est évaporée du sol.

### 3.2.5 Éclairage et activité humaine

L'impact de **l'éclairage artificiel** d'appoint sur le bilan énergétique de la serre se fait surtout sentir pendant les périodes clémentes de l'année; quand il manque peu de chauffage pour maintenir la température dans la serre à des niveaux adéquats. Comme on l'a spécifié à la section 2.1.6, ce sont des lampes HPS de 400 W qui sont généralement utilisées. Mais, en réalité, il faut fournir une puissance de 470 W lorsque l'on tient compte de l'énergie perdue par le ballast (transformateur). De ces 470 W, 340 W sont émis sous forme de rayonnement [12] et le reste sous forme de chaleur convective. Par contre, il y a toujours une grande partie du rayonnement émis qui est perdue à travers le fenêtrage (TRNSYS en tient compte). En règle générale, environ 30 % de l'énergie fournie aux lampes est convertie en chaleur dans la serre.

Dans le DECK, on spécifie l'éclairage en ajoutant aux termes  $\dot{Q}_{int}$  et  $\dot{Q}_{IR}$ , l'énergie qui leur est associée:

$$\dot{Q}_{int_{rez}} = \dots + 130 N_L \gamma_L \quad (3.19)$$

$$\dot{Q}_{IR_{rez}} = \dots + 340 N_L \gamma_L \quad (3.20)$$

où  $\dot{Q}_{int_{rez}}$  est l'énergie convective fournie au rez-de-chaussée (W)



$\dot{Q}_{IR_{rez}}$  est l'énergie lumineuse fournie au rez-de-chaussée (W),  
qui est incluse dans le terme  $s_i$  de l'équation (3.9)

$N_L$  est le nombre de lampe HPS 400 W

$\gamma_L = 1$  allumé (entre 8h00 et 24h00 si  $\dot{Q}_{s,6_-}/A_{6_-} < 25 \text{ W/m}^2$ )  
0 éteint

où  $\dot{Q}_{s,6_-}$  est le rayonnement solaire qui passe par le plafond  
du rez-de-chaussée ( $6_-$ ) (W)

Dans une serre, le niveau d'**activité humaine** n'est pas très élevé. Plus précisément, il est de 90 W et de 95 W en chaleur sensible et latente respectivement (personne debout, léger travail et marchant lentement [28]). On va considérer qu'il y a une personne en permanence dans chaque serre pour une durée de 8 heures par jour. Dans le DECK, cela est spécifié à travers les variables  $I_{act}$  et  $N_{pepl}$ :

$I_{act} = 5$  (code du niveau d'activité)

$N_{pepl} = 1 \cdot \gamma_{pepl}$  (nombre de personnes dans la serre) (3.21)

où  $\gamma_{pepl} = 1$  (entre 8h00 et 16h00)  
0

### 3.2.6 Transfert de chaleur et d'humidité entre les zones

L'emploi de 2 zones pour représenter une serre est utile soit pour simuler la stratification des propriétés de l'air, soit pour modéliser la présence d'une toile isolante séparant l'entre-toit du rez-de-chaussée. Par contre, cette façon de faire rend la modélisation un peu plus compliquée, comme le montre la figure (3.4).

En été comme en hiver, les échanges radiatifs entre les différentes surfaces dans la serre sont très importants. Cela est inévitable, car les grandes surfaces chaudes (le sol, les plantes et les murs isolés) font face aux grandes surfaces plus froides (fenêtrage). S'il y a une toile thermique qui sépare le rez-de-chaussée et l'entre-toit, le TYPE 19 calcule, de façon normale, les échanges radiatifs entre les différentes surfaces dans chacune des zones. Par

contre, lorsque la toile thermique est rétractée, il n'y a plus de mur physique qui sépare les 2 zones. Mais, le TYPE 19 continue quand même à calculer les échanges radiatifs comme s'il y avait toujours les parois 6\_ et 7. Pour remédier à ce problème, il faut faire en sorte que les parois du toit voient le mur 7 comme s'il représentait le rez-de-chaussée et que les parois du rez-de-chaussée voient le mur 6\_ comme s'il représentait l'entre-toit.

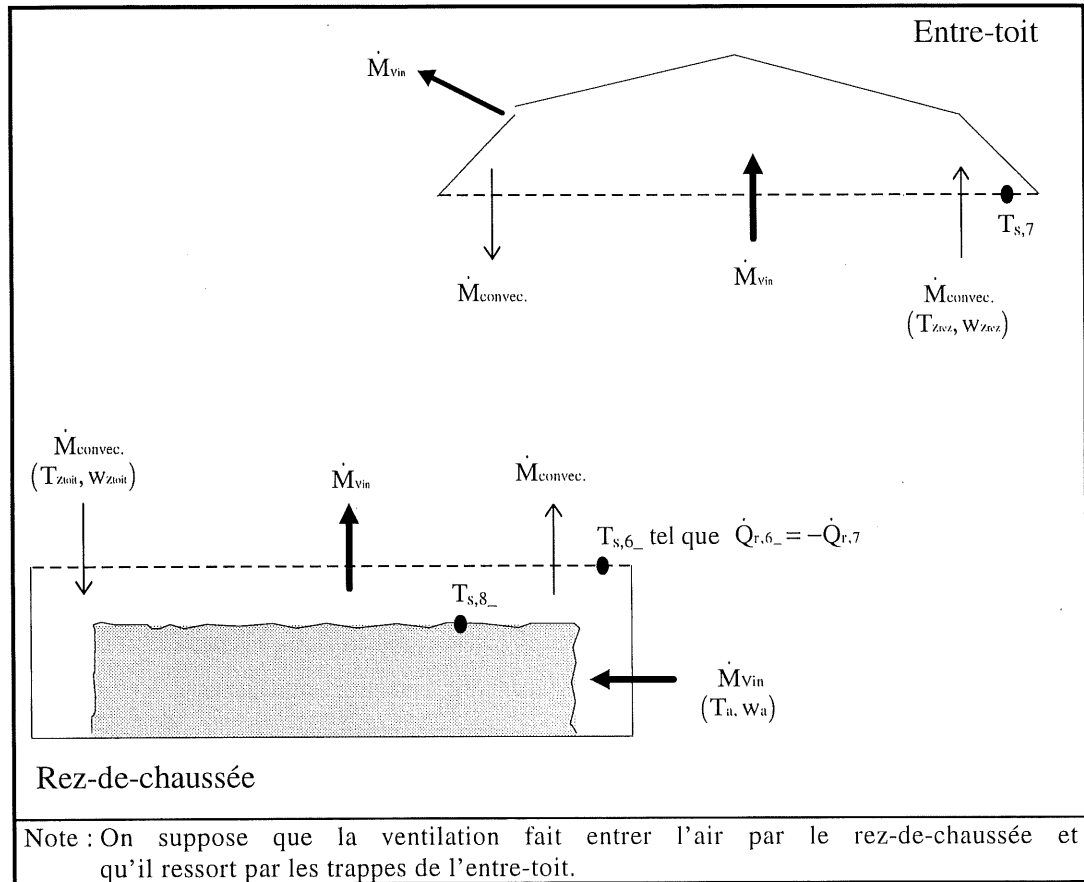


Figure 3.4 Échange thermique et massique entre les 2 zones

Pour modéliser ce principe, on fixe la température du mur fictif 7 à celle de la surface qui représente le mieux le rez-de-chaussée du point de vue du fenêtrage du toit. Cette surface est le mur de feuille 8\_. Plus les plantes sont hautes, plus cette hypothèse est réaliste. Le mur 6\_, quant à lui, devra engendrer les mêmes échanges radiatifs que le mur 7, mais de signe inverse. En d'autres mots, il faudra que  $\dot{Q}_{r,6\_} = -\dot{Q}_{r,7}$ .

L'imposition de  $T_{s,7} = T_{s,8_-}$  et de  $\dot{Q}_{r,6_-} = -\dot{Q}_{r,7}$  fait calculer par le TYPE 19 de faux échanges par convection au niveau de ces surfaces ( $\dot{Q}_{c,6_-}$  et  $\dot{Q}_{c,7}$ ). On enlèvera donc ces valeurs du bilan énergétique global par l'intermédiaire de  $\dot{Q}_{int}$  (voir équations (3.1) et (3.2)):

$$\dot{Q}_{intrez} = \dots - \dot{Q}_{c,6_-} \quad (3.22)$$

$$\dot{Q}_{inttoit} = \dots - \dot{Q}_{c,7} \quad (3.23)$$

La résolution du problème des échanges radiatifs n'est pas très compliquée à mettre en oeuvre. Par contre, les échanges thermiques et massiques (humidité) nécessitent l'ajout de plusieurs équations qui travaillent en parallèle avec le TYPE 19.

**Lorsque la toile thermique est présente**, cette dernière constitue une paroi réelle et le TYPE 19 calcule très bien les échanges thermiques à travers celle-ci ( $\dot{Q}_{c,6_-}$  et  $\dot{Q}_{c,7}$ ). En d'autres mots, les échanges sont représentés par l'équation:

$$\dot{Q}_{c,7} = -\dot{Q}_{c,6_-} = -A_{6_-} U_{toile} (T_{ztoit} - T_{zrez}) + \dot{Q}_{fuite} \quad (W) \quad (3.24)$$

$$\text{où } \dot{Q}_{fuite} \approx 10\% (\dot{Q}_{natu.} + \dot{Q}_{surpl.}) \text{ voir équations (3.25) et (3.26)}$$

**Dans le cas où il n'y a pas de toile thermique**, on utilise le même type d'équation, sauf que l'on remplace le coefficient  $U_{toile}$  par un coefficient de convection naturelle ( $U_{natu.}$ ). De plus, ces mouvements convectifs sont générés par les plus grands écarts de température qu'il y a entre le rez-de-chaussée et l'entre-toit. On retrouve généralement ces températures au niveau des surfaces ou l'air de la zone tout simplement. Dans ce cas, l'équation (3.24) devient:

$$\dot{Q}_{natu.} = A_{6_-} U_{natu.} (T_{zrez, max} - T_{s,4}) \quad (W) \quad (3.25)$$

$$\text{où } \dot{Q}_{natu.} = \text{chaleur échangée par les mouvements d'air convectifs (W)}$$

$$U_{natu.} = \text{coefficient convection naturelle d'une surface inclinée vers le bas (toit)}$$

$$= 2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \text{ lorsque } T_{zrez, max} > T_{s,4} [45]$$

= 0.039 W/m<sup>2</sup>.°C --> conduction thermique dans une cavité fermée (serre) lorsque  $T_{Zrcz, max} < T_{s,4}$

$T_{Zrcz, max}$  = température de l'air au rez-de-chaussée qui est la plus élevée ( $T_{Zrcz}$  ou  $T_{s,7_-}$  du sol) (°C)

$T_{s,4}$  = température à la surface interne n° 4 de l'entre-toit (°C)

Le système de chauffage génère lui aussi de la convection naturelle. La température de l'air qui sort des trous des longs tubes d'air chaud ou autour des tuyaux d'eau chaude atteint 60°C (voir section 2.1.6). Dans ce cas, on peut supposer que le surplus de chaleur fourni par le système de chauffage ( $\dot{Q}_{surpl.}$ ) monte vers l'entre-toit et est défini à partir de l'équation (3.25) de la façon suivante:

$$\dot{Q}_{surpl.} = A_{6_-} \cdot 2 \cdot (60 - T_{s,4}) \quad (W) \quad (3.26)$$

Maintenant, il faut inclure le résultat de ces 2 dernières équations dans le TYPE 19 de chaque zone pour qu'il soit pris en compte dans le bilan énergétique global. Il y a 2 façons directes d'ajouter ou d'enlever de la chaleur sensible à une zone. La première, c'est par une source ponctuelle  $\dot{Q}_{int}$  et la deuxième, c'est par la ventilation. Dans ce modèle, on a opté pour l'utilisation du système de ventilation. Ce dernier échange la chaleur d'une zone à l'autre par un transfert de masse. L'avantage de ce système, c'est qu'il permet, du même coup, un échange d'humidité qui sera fort utile pour le calcul de la condensation (déshumidification et variation de  $U_{fenêtrage}$ ).

Pour utiliser le système de ventilation, il faut connaître le débit qui passe d'une zone à l'autre. Ce débit est négligeable lorsque la température la plus basse dans l'entre-toit (ex.:  $T_{s,4}$ ) est plus chaude que la température la plus élevée au rez-de-chaussée (ex.:  $T_{Zrcz}$ ,  $T_{s,7_-}$ , ou le 60°C du chauffage). Dans ce cas, le transfert de chaleur entre les 2 zones ne se fait que par conduction. Dans le cas contraire, le débit d'air chaud qui monte par convection vers l'entre-toit et qui redescend, par conservation de la masse, est défini par l'équation (3.27). Cette équation est valide seulement lorsqu'il n'y a pas de système de

recirculation d'air forcé dans la serre. Si c'était le cas, la température et l'humidité dans les 2 zones seraient les mêmes.

$$\dot{M}_{\text{convec.}} = \text{MAX} \left( \frac{\dot{Q}_{\text{natu.}} + \dot{Q}_{\text{surpl.}}}{c_{p\text{moyrez}} (T_{\text{Zrez.}} - T_{s,4})}, \dot{M}_{\text{convec. max}} \right) \quad (\text{kg/s}) \quad (3.27)$$

où  $c_{p\text{moyrez}}$  = est la capacité thermique moyenne de l'air au rez-de-chaussée (1.021 kJ/kg.°C à  $T = 20$  °C et une humidité relative de 70 %)

$\dot{M}_{\text{convec. max}}$  = est le débit maximal de convection naturelle  
 $= (\frac{1}{2} A_{6\_}) 0.045 \text{ m/s} \cdot \rho_a = 0.027 A_{6\_} \text{ kg/s}$  [3]

Dans cette dernière équation, on considère que la température de l'air qui passe du rez-de-chaussée à l'entre-toit est celle de l'ensemble du rez-de-chaussée et non celle des sources chaudes. En effet, les sources chaudes se retrouvent au niveau du sol. Par conséquent, l'air chaud qu'elles produisent a amplement le temps de perdre sa chaleur avant d'atteindre l'entre-toit, surtout en passant à travers le «radiateur de feuilles». De plus, TRNSYS ne tient compte que des débits qui entrent dans la zone. En effet, l'air qui en sort est considéré comme ayant les mêmes propriétés que celles de l'ensemble de la zone, donc, il n'affecte pas le bilan énergétique global de la zone (ex.:  $T_{\text{zone}} - T_{\text{sortie}} = 0$ ).

L'équation (3.27) s'interprète de la façon suivante: plus la température extérieure est élevée, plus  $T_{s,4}$  tend vers  $T_{\text{Zrez.}}$  et plus le débit d'air qui amène l'air chaud vers le toit sera élevé, car il y a peu de perte de chaleur au niveau du rez-de-chaussée.

Finalement, dans chacune des 2 zones, les variables «INPUTS» réservées à la ventilation ( $\dot{M}_v$ ,  $T_v$  et  $w_v$ ) sont définies de la façon suivante (selon la figure 3.4):

#### **apport d'air dans l'entre-toit**

$$\dot{M}_{v\text{toit}} = \dot{M}_{\text{convec.}} + \dot{M}_{v\text{in}} \quad (\text{kg/s}) \quad (3.28)$$

$$T_{v\text{toit}} = T_{\text{Zrez.}} \quad (^\circ\text{C})$$

$$w_{v\text{toit}} = w_{\text{Zrez.}} \quad (\text{kg d'eau /kg d'air})$$

où  $\dot{M}_{vin}$  est le débit d'air frais en dehors de la serre qui est pompé à l'intérieur du rez-de-chaussée par le ventilateur qui contrôle l'humidité et/ou par les 2 autres qui préviennent la surchauffe.

### **apport d'air dans le rez-de-chaussée**

$$\dot{M}_{vrez} = \dot{M}_{convec.} + \dot{M}_{vin} \quad (\text{kg/s}) \quad (3.29)$$

$$T_{vrez} = \frac{T_a \dot{M}_{vin} + T_{zinit} \dot{M}_{convec.}}{\dot{M}_{vin} + \dot{M}_{convec.}} \quad (^\circ\text{C})$$

$$W_{vrez} = \frac{w_a \dot{M}_{vin} + w_{zinit} \dot{M}_{convec.}}{\dot{M}_{vin} + \dot{M}_{convec.}} \quad (\text{kg d'eau /kg d'air})$$

### **3.3 Schéma d'une simulation dynamique dans TRNSYS**

Pour mieux visualiser la méthode de résolution du présent modèle, la figure 3.5 montre l'organigramme d'une simulation.

Finalement, la figure B.1 de l'annexe B, montre un schéma plus détaillé des principales sous-routines que l'on doit spécifier à TRNSYS pour qu'il puisse calculer le bilan énergétique de la serre.

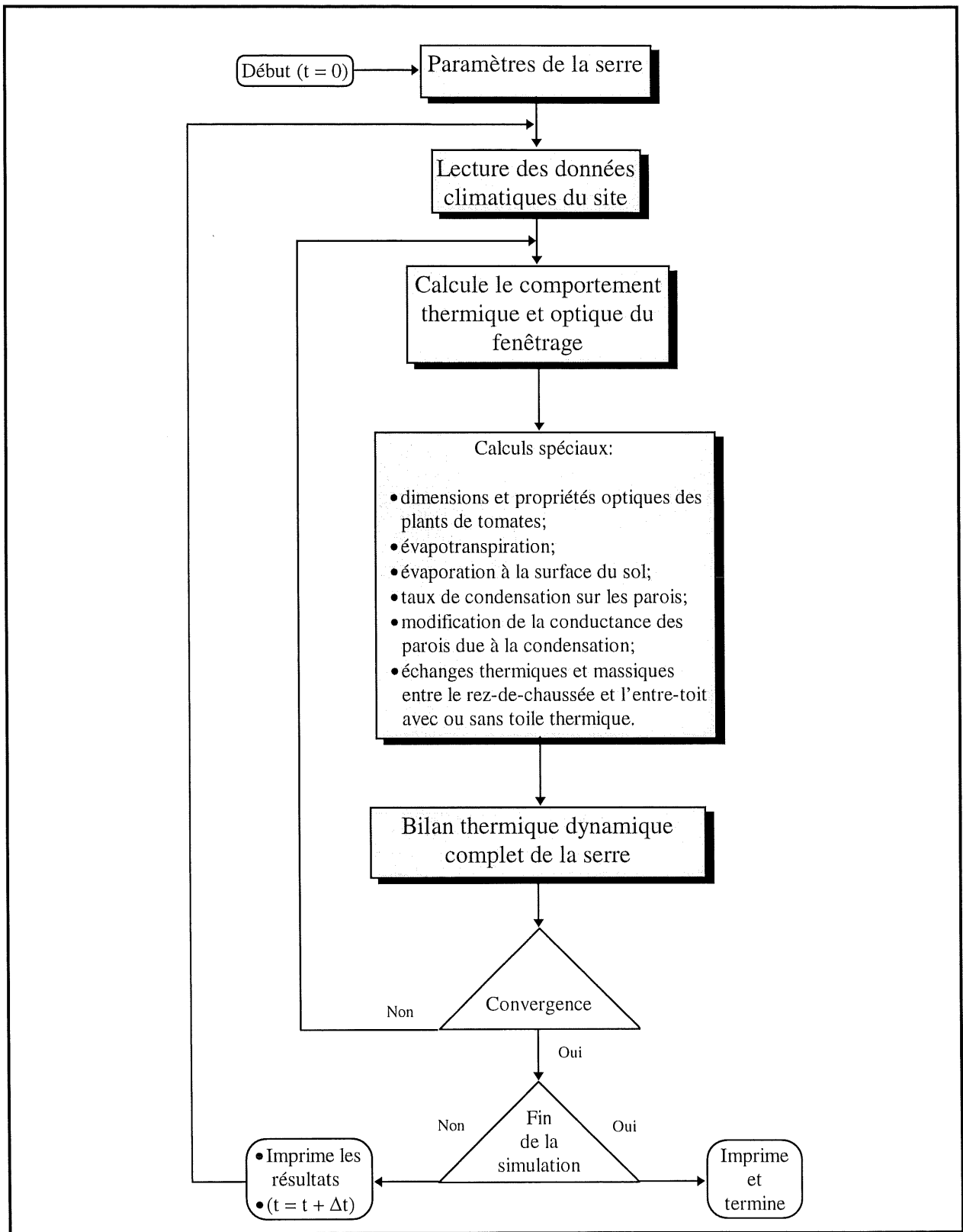


Figure 3.5 Organigramme d'une simulation

## 4. VALIDATION

Dans ce chapitre, la mise en oeuvre du modèle mathématique de la serre est validée. Pour ce faire, on compare les résultats générés par le modèle à ceux disponibles dans la littérature. La comparaison est faite en régime permanent et transitoire. Dans le régime transitoire, on vérifie tout particulièrement les équations d'évapotranspiration et de condensation, car ces phénomènes ont une influence non négligeable sur le bilan énergétique d'une serre.

### 4.1 Validation en régime permanent

Pour forcer le modèle à fonctionner en régime permanent, on a fixé les paramètres suivants:

- Température de l'air ambiant,  $T_a = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Humidité absolue de l'air ambiant,  $w_a = 0.00203\text{ kg eau / kg air}$  (pour 50 % d'humidité relative);
- Vent,  $W = 3\text{ m/s}$  (sur lequel sont basés la plupart des coefficients de convection de chaleur externe:  $h_{c,o} = 17\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ) [28, 30];
- Température de l'air au rez-de-chaussée,  $T_{\text{rez}} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Humidité absolue de l'air au rez-de-chaussée,  $w_{\text{rez}} = w_a$ ; (s'équilibre à  $w_a$  avec les infiltrations)
- Pertes de chaleur par infiltration,  $\dot{Q}_{\text{infl}} \neq 0$  (les infiltrations ne sont pas nulles, mais demeurent constantes);
- Valeurs fixées à zéro,  $\dot{M}_v = \dot{M}_{\text{cond},i} = \dot{Q}_{\text{feuille}} = \dot{Q}_{\text{evasol}} = 0$ .

C'est avec ces paramètres que seront réalisés les tests de vérification dans les 3 sous-sections qui suivent.



#### 4.1.1 Sans gains solaires, ni gains internes

Cette sous-section a pour objet de vérifier si le modèle calcule bien les déperditions thermiques à travers les parois sans l'influence du rayonnement lumineux ( $\dot{Q}_{\text{senSohscurité}}$ ):

$I = \dot{Q}_{\text{IR}_{\text{rez}}} = N_{\text{pepl}} = 0$ . Les résultats sont comparés à l'équation analytique suivante:

$$\dot{Q}_{\text{senSohscurité}} = \sum_i U_i A_i (T_{\text{zrez}} - T_e) + \sum_j U_j A_j (T_{\text{ztoit}} - T_e) + \dot{Q}_{\text{inflrez}} + \dot{Q}_{\text{infltoit}} \quad (4.1)$$

où  $i$  = 1\_, 2\_, 3\_, 4\_, 5\_ et 7\_ (numéros des surfaces au rez-de-chaussée selon la figure 3.1)

$j$  = 1, 2, 3, 4, 5 et 6 (numéros des surfaces à l'entre-toit selon la figure 3.1)

$T_e$  =  $T_a$  pour toutes les parois qui font faces à l'extérieur  
 =  $T_{\text{cabanon}} = 20^\circ\text{C}$  pour les murs 1\_ et 1  
 =  $\bar{T}_{1-2}$  pour le plancher

$U_i$  =  $3.67 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  pour le fenêtrage en polycarbonate  
 =  $0.3047 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  pour les murs isolés  
 =  $0.272 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  pour le mur de terre

$\dot{Q}_{\text{infl}}$  --> on n'évalue pas les pertes par infiltrations (on prend celles fournies par le modèle; qui ont été obtenues lors de l'étalonnage (voir l'annexe B, tableau B.1)).

La figure 4.1 donne l'écart entre la demande de chauffage calculée analytiquement, équation (4.1), et celle obtenue par le modèle (courbe «Écart (nuit)»). On note qu'il faut attendre environ 100 heures avant que les conditions initiales n'aient plus d'influence sur le modèle. À ce moment-là, la capacité thermique de la serre n'influence plus la demande en chauffage et on peut comparer le modèle à la solution analytique. Pour la courbe «Écart (nuit)», c'est la modélisation du sol qui empêche d'obtenir un écart en deçà de 0.7 %. En effet, le sol possède une grande capacité thermique, de sorte que l'on devrait attendre encore plusieurs jours avant que l'écart puisse se rapprocher encore plus près de 0. Mais il faudrait fixer  $\bar{T}_{1-2}$  pour que cela se produise, même si ce dernier varie très lentement.

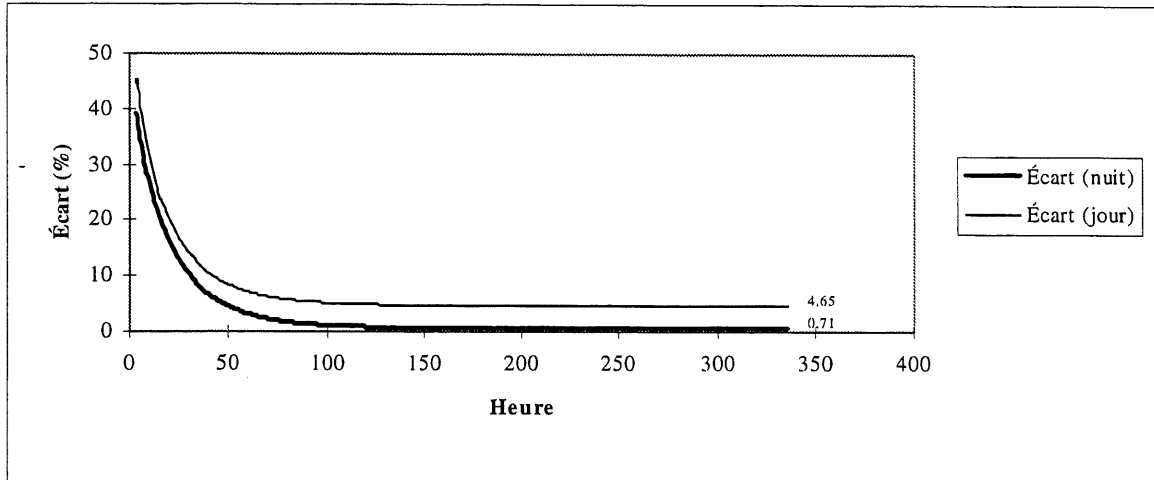


Figure 4.1 Écart sur  $\dot{Q}_{\text{sens}}$  entre l'équation analytique et le modèle

#### 4.1.2 Avec gains solaires, mais sans gains internes

La validation des gains solaires est beaucoup plus difficile à réaliser que celle effectuée à la section précédente. En effet, les gains solaires dépendent d'une multitude de réflexions internes couplées à de l'absorption et qui varient selon le rayonnement direct et diffus. Pour simplifier les équations analytiques, on envoie de la lumière solaire qu'à travers le fenêtrage 5\_ et avec un angle d'incidence nulle. Le rayonnement total envoyé ( $IT_{5\_}$ ) est de  $5000 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}$ , dont  $3000 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}$  sont du rayonnement direct ( $IbT_{5\_}$ ). Selon ces conditions, l'absorption lumineuse est donnée par l'équation ci-dessous:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{senSoleil}} = \dot{Q}_{\text{senSécurité}} + (1-\rho_{8\_}) \dot{Q}_{\text{bs}_{5\_}} + \rho_{8\_} \dot{Q}_{\text{bs}_{5\_}} [F_{8\_1\_}(1-\rho_{1\_}) + F_{8\_2\_}(1-\rho_{2\_}) + \\ F_{8\_3\_}(1-\rho_{3\_}) + F_{8\_7\_}(1-\rho_{7\_}) + \dots] \\ + \dot{Q}_{\text{diff}_{5\_}} [F_{5\_1\_}(1-\rho_{1\_}) + F_{5\_2\_}(1-\rho_{2\_}) + \\ F_{5\_7\_}(1-\rho_{7\_}) + F_{5\_8\_}(1-\rho_{8\_}) + \dots] \end{aligned} \quad (4.2)$$

où  $\rho_i$  = réflexivité de la surface  $i$

$\dot{Q}_{\text{bs}_{5\_}}$  =  $IbT_{5\_}$  X taux de transmission lumineuse du fenêtrage  
(tout  $\dot{Q}_{\text{bs}_{5\_}}$  frappe le mur 8\_)

$\dot{Q}_{\text{diff}_{5\_}}$  = rayonnement diffus ayant passé à travers le fenêtrage

$F_{ij}$  = facteur de forme de la surface  $i$  à la surface  $j$

Les 3 petits points «...» signifient qu'il y a encore beaucoup d'autres absorptions par réflexions multiples. Par contre, on néglige ces derniers. Les résultats obtenus apparaissent à la figure 4.1 sous l'étiquette «Écart (jour)». Le profil de la courbe obtenu est le même que celui de la courbe sans gains solaires, sauf que l'écart minimal entre les valeurs données par le modèle et celles de l'équation (4.2) est de 4.65 %. Cet écart doit surtout provenir de l'omission des termes de réflexion d'ordre 2 et plus, de même, que de l'augmentation de la température des surfaces internes de la serre ( $T_{s,i}$ ) et de la surface externe 5\_ ( $T_{sa,5\_}$ ) due au chauffage qu'occasionne le rayonnement. Cette validation a permis de vérifier que les résultats calculés par TRNSYS en régime permanent se situent dans un bon ordre de grandeur. Cependant, cette validation ne permet pas d'établir la précision des résultats puisque l'équation (4.2) constitue en soi une approximation.

#### 4.1.3 Sans gains solaires, mais avec gains internes

L'éclairage artificiel peut représenter un apport d'énergie non négligeable à la serre. Lorsqu'il y a un tel éclairage, TRNSYS diffuse uniformément la lumière sur toutes les surfaces internes de la serre. Par contre, seuls les murs opaques absorbent la lumière, alors qu'elle est perdue à travers le fenêtrage. Ces gains internes ont été vérifiés à l'aide de l'équation suivante:

$$\dot{Q}_{\text{sens éclairage}} = \dot{Q}_{\text{sens obscurité}} + \left( \frac{A_{\text{opaque}}}{A_{\text{total}}} \right) \times \dot{Q}_{\text{IRrev}} + 130 N_L \quad (\text{W}) \quad (4.3)$$

où  $A_{\text{opaque}} = A_{1\_} + A_{2\_} + A_{3\_} + A_{7\_} + A_{8\_}$  = superficie des surfaces opaques dans le rez-de-chaussée ( $\text{m}^2$ )

$\dot{Q}_{\text{IRrev}}$  = énergie radiative des lampes au plafond du rez-de-chaussée (W)

$A_{\text{total}} = A_{\text{opaque}} + A_{4\_}, A_{5\_}$  et  $A_{6\_}$  = superficie totale des surfaces dans le rez-de-chaussée ( $\text{m}^2$ )

$130 N_L$  = chaleur convective perdue par le ballast de chaque lampe (voir équation (3.19)) (W)

$N_L$  = nombre de lampes (--)

Les résultats obtenus suivent une courbe presque identique à celle de «Écart (nuit)» de la figure 4.1. On obtient donc des résultats beaucoup plus précis que la courbe «Écart (jour)»

générée lorsqu'il y a du rayonnement solaire. La raison à cette plus grande précision est que TRNSYS ne considère pas de réflexion sur les parois internes pour l'éclairage artificiel.

## 4.2 Validation en régime transitoire

Dans cette section, on utilisera le modèle dans son ensemble, sans aucune simplification. Pour valider un tel code, on devra se baser sur des modèles simplifiés reconnus et des résultats expérimentaux. Mais le terme «simplifiés» signifie ici que la validation se fait généralement sur une base mensuelle afin de ne pas être obligé de tenir compte des affres du climat. Dans le cas des résultats expérimentaux, les paramètres qui ont mené à ces valeurs ne sont habituellement pas connus sur une base horaire, ou bien, incomplets<sup>2</sup>. Dans ce cas, seules quelques composantes du modèle de la serre pourront être validées sur une base horaire, alors que l'ensemble du système devra être évalué sur une base mensuelle.

Toutes les simulations sont effectuées avec un critère de convergence de 1 %. Le pas de temps, quant à lui, doit être une fraction d'heure sans troncature, afin d'éviter l'accumulation d'erreurs temporelles. En deçà de 1/16 d'heure, la précision n'augmente presque plus malgré le temps de calcul supplémentaire requis. Par conséquent, l'incrémentation dans le temps se fera à tous les 1/16 d'heure (3.75 minutes).

Dans les 4 sous-sections qui suivent, on valide 4 des éléments les plus importants, soit l'évapotranspiration, la condensation, la stratification thermique entre les 2 zones et le bilan énergétique global.

---

<sup>2</sup> La plupart des paramètres expérimentaux de la serre à La Pocatière sont connus, sauf que cette serre fonctionne avec un échangeur-accumulateur de chaleur sous son plancher. Le modèle de ce présent rapport ne peut inclure un tel échangeur (avec tuyaux), de là, l'incompatibilité du modèle avec la plupart des résultats expérimentaux de La Pocatière.

#### 4.2.1 Évapotranspiration

L'évapotranspiration est un processus très «énergivore» pour des cultures ayant beaucoup de feuillage. En effet, les plantes doivent évaporer presque autant d'eau que la quantité de rayonnement absorbé. La figure 4.2 compare les résultats obtenus par le présent modèle avec 3 autres modèles bien renommés, soit 2 modèles de Stanghellini (celui qu'il nomme «règle du pouce» et le détaillé) [44] et le modèle de Kittas [48].

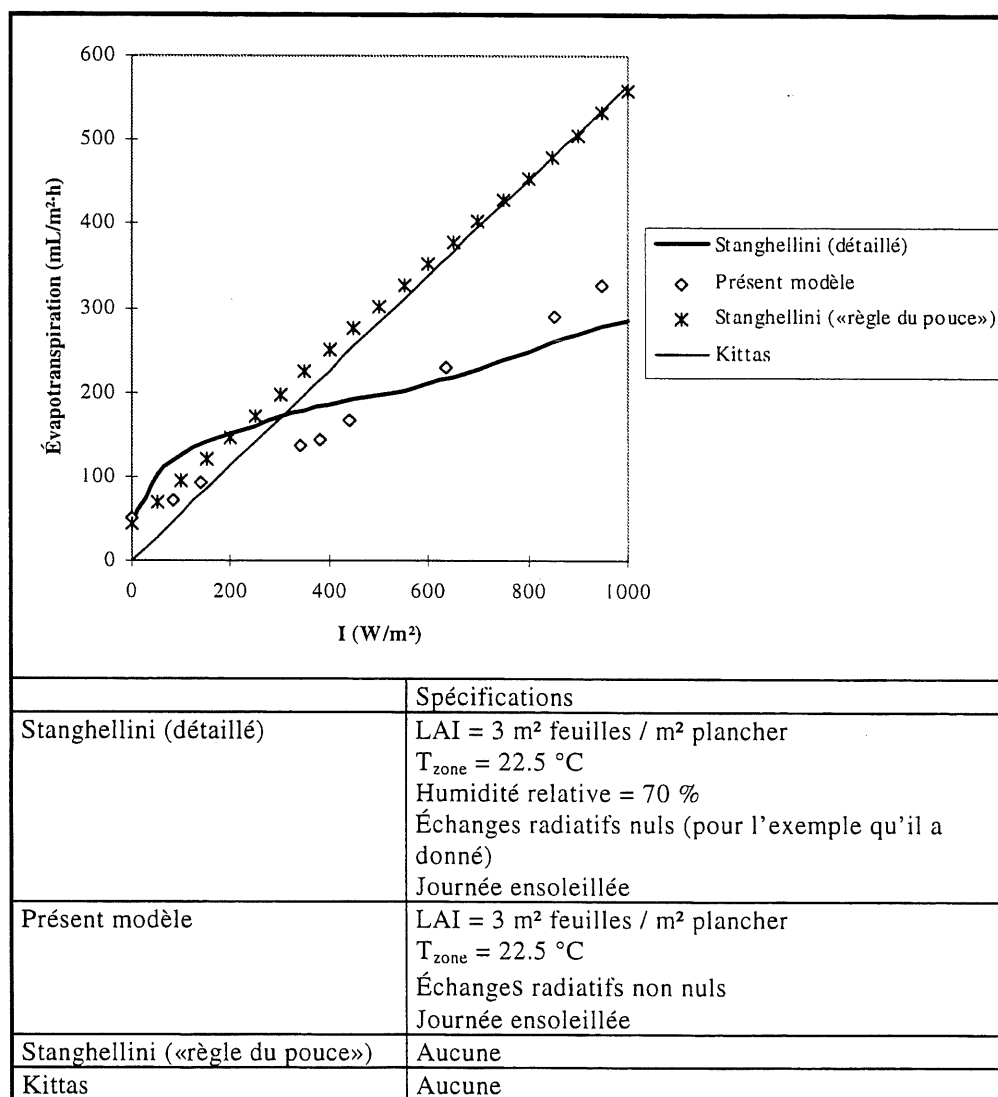


Figure 4.2 Évapotranspiration de plants matures de tomates selon le rayonnement extérieur à la serre

On remarque que les résultats que l'on génère sont du même ordre de grandeur et varient dans le même sens que celui du modèle détaillé. En contrepartie, les 2 autres modèles ne sont utilisés que pour donner un ordre de grandeur de la transpiration des plantes, et cela, pour de faibles à moyennes intensités lumineuses. Il faut noter que le modèle détaillé tient compte du métabolisme des plantes (résistances volontaires des feuilles à la transpiration), de même que du taux d'humidité de l'air, ce que ne fait pas le présent modèle. Stanghellini a montré qu'une variation de  $\pm 10\%$  du taux d'humidité autour de la moyenne à  $70\%$  fait varier l'efficacité du taux de transpiration de  $\mp 12\%$  (variation inverse). Cela signifie que sur une base journalière, notre modèle pourrait générer des erreurs de l'ordre de  $\mp 12\%$  pour un «humidistat» fixé à  $70\%$  avec un grand hystérésis de  $\pm 10\%$ . Par contre, en moyennant les écarts sur plusieurs jours, on peut s'attendre à ce que l'erreur résultante moyenne soit bien en deçà de  $12\%$  et tende même vers 0. De plus, l'exemple du modèle détaillé considère que les parois sont toutes à la température de l'air. Pour de moyennes à faibles intensités lumineuses, cela n'a pas de grandes conséquences sur l'évapotranspiration. Par contre, dans le cas de forts rayonnements, cette contrainte, que Stanghellini a imposée pour son exemple, sous-estime de  $17\%$  la transpiration des feuilles (selon le rapport  $\dot{Q}_{r,s}/S_{s-}$  de l'équation (3.13)). Cela signifie que les résultats que l'on a obtenus pour le rayonnement intense coïncideraient assez bien avec les siens.

Le plancher, quant à lui, évapore une quantité d'eau journalière moyenne de  $0.276 \text{ L/m}^2$  (juillet). Cette valeur se situe dans l'ordre de grandeur de ce que Lascano et Bavel [54] ont mesuré 3 jours après un arrosage par inondation (sol moyennement humide). En effet, en faisant quelques calculs de transformation des conditions climatiques, la valeur quotidienne qu'ils auraient mesurée, s'ils avaient été dans la serre à La Pocatière, serait de  $0.36 \text{ L/m}^2$  (avec la présence des plants de tomates). Il est difficile d'être plus précis, car la mesure de ce paramètre est ardue à effectuer. Notamment, ce dernier dépend des propriétés du sol, du rayonnement qu'il reçoit, de sa température, du taux d'humidité de l'air, etc.

#### 4.2.2 Condensation

La validation du taux de condensation se fera avec les données expérimentales de Lacroix [55]. Ce dernier utilisait un recouvrement de verre de 6 mm ( $5.8 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ) et une différence de température intérieure-extérieure ( $T_z - T_a$ ) de  $20^\circ\text{C}$ . Pour offrir le même transfert de chaleur, il faut que le polycarbonate double ( $3.67 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ) du modèle ait une différence de température de  $31.6^\circ\text{C}$ . Les résultats obtenus apparaissent à la figure 4.3. Sur cette figure, on remarque que le taux de condensation obtenu tend à être un peu plus élevé que celui mesuré par Lacroix. Par contre, il faut noter que l'écart  $T_z - T_a$  sur lequel on a trouvé la plupart de nos résultats se concentre autour de  $33.5^\circ\text{C}$ , au lieu de  $31.6^\circ\text{C}$ . Cela fait nécessairement accroître le taux de condensation. Néanmoins, le taux de condensation calculé donne quand même des valeurs réalistes.

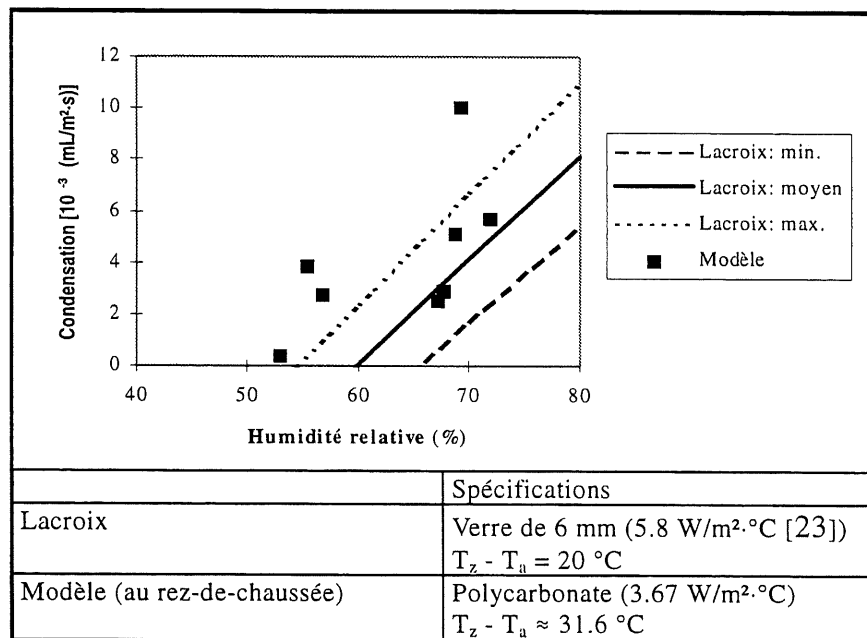


Figure 4.3 Taux de condensation en fonction de l'humidité relative

#### 4.2.3 Stratification thermique entre les 2 zones

Lorsqu'il n'y a pas de rideau thermique, il est important de vérifier si la convection naturelle générée par le modèle transfère la bonne quantité de chaleur entre les 2 zones. On

vérifie cela en mesurant la différence de température entre ces zones. Par temps froid ( $T_z - T_a = 19.7\text{ °C}$ ) et lorsque le système de chauffage est en marche, Seginer et al. [56] ont mesuré que la température de l'entre-toit est en moyenne  $5.8\text{ °C}$  inférieure à celle du rez-de-chaussée. Pour des conditions similaires, le présent modèle donne un écart de  $4\text{ °C}$ . Cela est relativement bon, compte tenu que la forme de leur serre (hémisphère) était différente de celle du présent modèle. Par temps chaud, le modèle donne une température pour l'entre-toit d'environ  $5\text{ °C}$  supérieure à celle du rez-de-chaussée (ventilation coupée). Par contre, dans la littérature, l'écart mesuré entre le milieu de l'entre-toit et le milieu du rez-de-chaussée est d'environ  $10\text{ °C}$  [22, 57]. Une partie de cette différence peut provenir du fort taux d'infiltration d'air que l'on a dû imposer au modèle pour qu'il soit similaire à celui mesuré à la serre de référence à La Pocatière. Mais, cet écart doit surtout provenir des hypothèses simplificatrices du modèle lui-même. En effet, on a limité à 2 zones la représentation thermique de l'ensemble de la serre, alors que dans la littérature, cette représentation se fait en 4 ou 5 zones.

De toute façon, ces mauvais résultats surviennent lorsque l'on coupe la ventilation. En réalité, la ventilation fonctionne toujours par temps chaud et ensoleillé et l'air sort par les trappes du toit dans le présent modèle. Par conséquent, on ne rencontre pas ce problème de stratification.

#### 4.2.4 Bilan énergétique global

Après avoir validé chacune des composantes stratégiques du modèle, il faut vérifier le comportement de l'ensemble du système formé de ces sous-éléments en question. Pour ce faire, on compare les résultats que l'on obtient à ceux générés par la méthode du C.R.E.A.Q. [6]. Cette méthode tient compte des pertes thermiques de la serre par conduction et infiltration ainsi que des gains thermiques dus à l'ensoleillement. De plus, elle tient compte du surplus de chaleur au-dessus de la température de consigne. Mais, cette méthode ne prend pas en considération l'évapotranspiration, ni la ventilation du surplus d'humidité.



L'équation du C.R.E.A.Q. est représentée sous la forme suivante:

$$\dot{Q}_{\text{SENS C.R.E.A.Q.}} = U_i \left( \sum_i A_i (T_a - T_{\text{Zrez}}) + \sum_j A_j (T_a - T_{\text{Ztoit}}) \right) + A_{6\_} \cdot e \cdot I \quad (4.4)$$

où  $\dot{Q}_{\text{SENS C.R.E.A.Q.}}$  = chauffage requis (nulle si  $> 0$  --> non appliqué ici)  
(W)

$A_i$  = superficie de la surface  $i$  ( $\text{m}^2$ )

$i$  = 2\_, 3\_, 4\_, 5\_ (numéro des surfaces au rez-de-chaussée selon la figure 3.1)

$j$  = 2, 3, 4, 5 et 6 (numéro des surfaces dans l'entre-toit selon la figure 3.1)

Notes: on ne considère pas de pertes par le cabanon ( $i=1\_$  et  $j=1$ )

$U_i$  =  $4.866 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  = déperditions thermiques des murs externes (pour la serre à La Pocatière en tenant compte des infiltrations)

$e$  = 60 % = efficacité globale de la serre à capter le rayonnement solaire

$I$  = rayonnement solaire global externe ( $\text{W/m}^2$  de surface horizontale)

La figure 4.4 illustre la différence sur le bilan de chauffage qu'il y a entre la valeur calculée par la méthode du C.R.E.A.Q. et celle par le modèle de ce rapport. On remarque que les 2 méthodes donnent des résultats similaires entre le mois d'avril et le mois de novembre. Pour les autres mois, le C.R.E.A.Q. sous-estime les pertes thermiques et surestime les gains solaires. En effet, les infiltrations dans le présent modèle varient en fonction de la température et du vent de l'extérieur de la serre, alors qu'elles sont toujours constantes dans la méthode comparative. Donc, plus le vent est fort et que l'air extérieur est froid, plus les pertes énergétiques par infiltrations accroîtront la différence. Par contre, par temps très chaud, cela ne crée presque pas de différence puisque l'on ne climatise pas l'air, seuls les ventilateurs fonctionnent (beaucoup moins «énergivore»). Pour ce qui est de la surestimation des gains solaires, notre modèle tient compte de l'angle d'incidence entre le rayonnement et le fenêtrage, ce que ne fait pas l'autre modèle. On sait, qu'en hiver, cet angle d'incidence est très élevé pour les grandes surfaces du toit, ce qui en résulte une diminution de la pénétration

solaire. On peut vérifier cela, en comparant les 2 courbes au printemps et à l'automne. À l'automne, le rayonnement direct est moins important qu'au printemps. Par conséquent, l'erreur générée par le terme  $e$  dans l'équation (4.4) est moins apparente, de là, le plus faible écart entre les courbes.

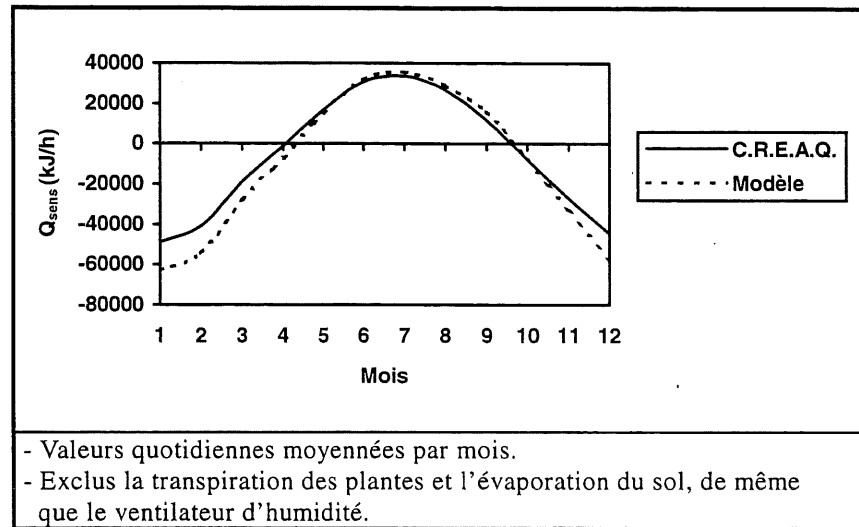


Figure 4.4 Bilan de chauffage mensuel d'une serre

Finalement, l'économie d'énergie créée par la présence d'une toile thermique a été mesurée par beaucoup d'auteurs. Sur une base annuelle, les économies de chauffage nocturne calculées par le modèle sont de 35.9 %. Les tests de déperdition effectués sur la serre de référence à La Pocatière donnent une économie de 28 à 30 %. L'écart entre la valeur calculée et mesurée vient peut-être d'une trop grande étanchéité de la toile thermique du modèle. En effet, on a fixé les fuites d'air qui passent du rez-de-chaussée à l'entre-toit à 10 % (voir équation (3.24)). En réalité, ces fuites sont peut-être plus élevées. Seules des mesures pourraient le certifier.

Calculées sur l'ensemble de la journée, les économies annuelles de chauffage sont de 25.4 %. Cette dernière valeur se situe bien dans l'ordre de grandeur que l'on retrouve dans la littérature, soit de 25 à 33 % pour une toile thermique de plafond [18, 40].

En résumé, le modèle a montré qu'il donnait de bons résultats tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Le logiciel peut maintenant être utilisé avec ses sous-routines particulières: croissance et transpiration des plantes, évaporation du sol, échanges radiatifs et condensation, que peu d'auteurs évaluent dans leur modèle.

## 5. ANALYSE PARAMÉTRIQUE

Maintenant que le modèle de la serre commerciale a été validé, on peut passer à l'étape des simulations pour répondre au principal objectif de ce rapport. Selon cet objectif, on doit déterminer la quantité d'énergie solaire que l'on pourrait théoriquement stocker le jour afin de la récupérer la nuit pour chauffer la serre. Cette étude doit se faire pour une année complète et pour différentes régions du Québec. Il faut noter que le but n'est pas de refaire la conception d'une serre afin qu'elle puisse mieux capter l'énergie solaire, mais plutôt, d'étudier celles qui existent déjà pour déterminer s'il est avantageux de leur intégrer un échangeur-accumulateur de chaleur sous leur plancher.

Dans un premier temps, on définit les dimensions et les propriétés de la serre standard sur laquelle est basée la présente étude. De cette serre, on détermine les paramètres qui génèrent le plus de pertes énergétiques. Par la suite, on étudie les effets engendrés par la modification de certains paramètres fixes: mur nord isolé, type de recouvrement et serres jumelées, de même que par la modification de certains paramètres non fixes: type de culture, moment de la plantation et toile imperméable blanche sur le plancher. L'effet de la position géographique de la serre sur le bilan de chauffage est évalué et le surplus d'énergie solaire que l'on pourrait théoriquement stocker en fonction des mois est estimé. Finalement, on suggère certaines améliorations simples et peu coûteuses que tout serriculteur pourrait effectuer lui-même afin de réduire sa consommation énergétique.

### 5.1 Caractéristiques de la serre standard

En se basant sur Bernier [12] et Les Industries Harnois Inc. [13], on établit que les caractéristiques d'une serre commerciale québécoise typique sont:

- Longueur: 30.5 m (100 pieds).
- Largeur: 7.62 m (25 pieds).
- Hauteur du rez-de-chaussée: 2.5 m (8.2 pieds).

- Hauteur totale: 4.3 m (14.1 pieds).
- Mur à l'est isolé jusqu'à 1.64 m (5.4 pieds) avec  $RSI = 3.5 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ . Cette hauteur est arbitraire car elle varie beaucoup d'une serre à l'autre. Parfois, le mur où l'on retrouve les portes et les panneaux électriques est presque entièrement isolé.
- Serre recouverte de polyéthylène double gonflé d'air (2 x 0.15 mm d'épaisseur).
- Toile thermique la nuit.
- Pas de toile imperméable qui recouvre le sol (pour réduire l'évaporation en surface).
- Pas de chauffage du sol, ni de production de  $\text{CO}_2$ .
- Infiltrations: 1.3 changement d'air par heure (étalonné sur le climat annuel moyen à la ville de La Pocatière ( $T_{z \text{ nuit}} - T_a = 14.3 \text{ } ^\circ\text{C}$  et  $\text{Vent} = 3.9 \text{ m/s}$ ).
- Éclairage artificiel: c'est peu employé (coûteux en installation), mais on a quand même opté pour un faible éclairage d'environ 8 à 9  $\text{W/m}^2$  qui permet une croissance minimum des plantes (du coucher du soleil jusqu'à minuit) [23].  
[ >50  $\text{W/m}^2$  ]
- Cultures tardives de plants de tomates (15 mars au 1<sup>er</sup> juillet; 1<sup>er</sup> août au 15 décembre).
- Température de culture:
  - 22.5  $^\circ\text{C}$  (moyenne le jour);
  - 13  $^\circ\text{C}$  (minimum la nuit, basée sur la serre à La Pocatière pour permettre la comparaison lors de la phase II du projet ÉCHAS (étude du stockage de chaleur dans le sol));
  - > 25  $^\circ\text{C}$  (2 ventilateurs d'aération mis en fonction: débit volumique variant entre 0 et 14.2  $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- Humidité relative maximale: 80 %, au-delà de laquelle le ventilateur pour abaisser l'humidité démarre (débit volumique variant entre 0 et 2.2  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Sauf indication contraire, le climat de référence sera celui à la ville de La Pocatière.

## 5.2 Détermination des paramètres «énergivores»

En effectuant une simulation sur une année et en comparant l'énergie consommée par différents paramètres de la serre standard, on peut déterminer ceux qui sont les plus grands

consommateurs d'énergie. La figure C.1a de l'annexe C montre la répartition de la consommation énergétique dans une serre pour les 2.5 mois les plus froids de la première et de la deuxième culture (16 mars au 31 mai et 1<sup>er</sup> octobre au 15 décembre). On ne peut pas vraiment faire de comparaison entre ces 2 périodes de l'année, puisque celle du printemps correspond au début de la croissance de la 1<sup>re</sup> culture, alors que celle de l'automne correspond à la fin de la croissance de la 2<sup>e</sup> culture. Par contre, les 2 illustrations nous montrent clairement où se perd l'énergie. En moyenne, la répartition des pertes se fait comme suit:

- 43 % par le recouvrement;
- 20 % par les infiltrations;
- 21 % par évapotranspiration;
- 5 % par évaporation à la surface du sol;
- 7 % par la ventilation du surplus d'humidité;
- 4 % par tous les autres facteurs.

Il faut noter que ces valeurs sont basées sur une moyenne journalière, car la part relative de chacune de ces valeurs varie beaucoup entre le jour et la nuit. Le jour, les pertes par évapotranspiration et par ventilation du surplus d'humidité peuvent devenir les facteurs de consommation énergétique dominants. La figure C.1b montre la fréquence d'apparition de la condensation selon les mois et selon l'heure de la journée. Évidemment, la condensation est plus fréquente pendant les mois froids, mais on remarque qu'elle apparaît plus souvent sur les surfaces de l'entre-toit que sur celles du rez-de-chaussée. Cela est dû à la présence de la toile thermique qui rend l'air et les surfaces de l'entre-toit beaucoup plus froids. Par conséquent, les 10 % de fuites d'air chaud et humide, qui passent à travers la toile thermique en provenance du rez-de-chaussée, voient leur humidité se condenser sur les parois de l'entre-toit. On a noté que le fait de faire varier la conductance des parois en fonction du taux de condensation change peu la demande énergétique globale; elle n'augmente que de 0.4 %. Une des raisons qui explique cela est que la condensation accroît les pertes par les parois, mais du même coup, elle fait diminuer l'humidité dans l'air et par

conséquent, les besoins de ventilation du surplus d'humidité décroissent. De plus, puisque les pertes thermiques par l'entre-toit sont moins importantes lorsque la toile thermique est déployée, alors les effets de la condensation se font encore moins sentir sur la demande globale de chauffage.

Parmi les 5 paramètres les plus «énergivores», 3 peuvent facilement faire l'objet d'améliorations:

- Recouvrement --> toile thermique sur les murs de côté la nuit;
- Infiltrations --> calfeutrer davantage les fuites d'air;
- Évaporation au sol --> installer une toile imperméable blanche sur le sol.

Par contre, il est beaucoup plus difficile de tenter de réduire l'évapotranspiration naturelle des plantes et la ventilation du surplus d'humidité sans affecter négativement le rendement de la culture.

La figure C.1c montre l'importance de la présence des plantes dans le bilan énergétique d'une serre. Au printemps, on note que l'évapotranspiration retarde d'environ un mois le moment où la serre commence à avoir un bilan énergétique journalier positif. Pour l'automne, on doit retrancher environ 3 semaines à la durée de la période où il y a surplus d'énergie.

### **5.3 Effets produits par la modification de paramètres**

Maintenant que l'on connaît l'importance de l'énergie consommée par les principaux paramètres de la serre, on va étudier les effets que certaines modifications apportées peuvent avoir sur la demande énergétique. Les modifications porteront sur des paramètres fixes tels que le type de recouvrement, l'isolation du mur nord et le regroupement de serres. Également, l'étude portera sur des modifications non fixes telles que le type de culture, le moment de la plantation et le recouvrement du sol par une toile imperméable blanche.

### 5.3.1 Modification de paramètres fixes

Les figures C.2a et C.2b montrent l'influence du **type de recouvrement** sur le comportement thermique, massique et optique de la serre standard. On note que l'emploi d'un recouvrement de polycarbonate ou bien de polyéthylène ne crée pas beaucoup de différences. On obtient un écart moyen de consommation d'énergie de 10 % sur une base annuelle. Bien que la transmission lumineuse et la durée de vie du polycarbonate soient supérieures (voir tableau 2.1), les serriculteurs optent quand même pour le polyéthylène surtout à cause de son coût unitaire qui est environ 28 fois inférieur.

Dans le cas du verre, même si ce matériau permet de capter beaucoup plus d'énergie solaire, sa plus faible résistance thermique rend la demande énergétique très importante par temps froids. Il crée un écart moyen de consommation d'énergie de 46 % supérieur à celui du polyéthylène. Par contre, le verre engendre un fort taux de condensation, ce qui a pour effet de réduire les besoins de ventilation du surplus d'humidité.

Mis à part le type de recouvrement, certains serriculteurs optent pour **l'isolation complète du mur nord** et le peignent en blanc. Les figures C.3a à C.3c montrent l'effet produit sur la serre standard lorsque l'on isole son mur nord. On remarque que la diminution du rayonnement lumineux reçu par les plantes à l'automne est moins importante que pour les mois correspondants du printemps (les mois ayant la même inclinaison solaire). On obtient donc le contraire de ce que l'on s'attendait. En effet, à l'automne, le rayonnement diffus peut représenter jusqu'au 2/3 du rayonnement solaire total. Pour cette raison, beaucoup de serriculteurs n'isolent pas le mur nord afin de maximiser les gains solaires pendant cette période. Ce qui peut expliquer ces résultats surprenants, c'est que le mur nord capte le rayonnement diffus provenant du ciel, mais il capte également le rayonnement réfléchi au niveau du sol. Alors, s'il y a peu de rayonnement direct, il y a peu de rayonnement réfléchi qui entre par le mur nord. De plus, le coefficient de réflexion du sol est moins élevé à l'automne qu'à l'hiver et qu'au printemps [33]. En effet, ce coefficient est de 0.6 pour janvier à la mi-février et il décroît par la suite jusqu'à 0.2 pour la mi-avril. Il demeure à cette



valeur jusqu'à la mi-novembre pour finalement revenir à 0.6 à la fin décembre. Une autre raison qui pourrait expliquer ces résultats surprenants est la hauteur des plantes. En effet, au mois de mars, les plantes sont beaucoup moins hautes et moins denses que pour le mois d'octobre ayant le même azimuth solaire. Par conséquent, en mars, beaucoup de rayonnement direct qui entre par les parois du sud frappe le sol et est réfléchi vers le mur nord sans même toucher aux plantes. Si ce mur nord n'est pas isolé, le rayonnement est perdu à travers la paroi transparente. Mais, si ce mur est isolé, le rayonnement qu'il reçoit est à nouveau réfléchi et une partie sera captée par les plantes, de là, la différence de gains solaires comparée à un mur transparent et à un mois où il y a peu de rayonnement direct qui est réfléchi par le sol (grande densité de feuillage). Les pertes de gains solaires sont en moyenne de 6.3 % sur une base annuelle lorsque le mur nord est isolé.

Par contre, le mur isolé fait diminuer les besoins de chauffage annuels de 18.65 %. Mais, malgré que les plants de tomates reçoivent un peu moins de rayonnement solaire, ils évaporent quant même une quantité d'eau équivalente. La raison de ce phénomène, comme on le remarque à la figure C.3b, est que le mur de plantes subit moins de pertes radiatives (ou plus de gains selon la différence de température entre les plantes et les surfaces environnantes) que si le mur nord n'était pas isolé. En sachant que l'évapotranspiration est proportionnelle aux gains solaires et aux échanges radiatifs (voir équation (3.13)) alors, il est normal que la réduction des gains solaires tend à être annulée par l'augmentation des gains radiatifs. Le faible écart dans l'évapotranspiration fait en sorte que les pertes dues à la ventilation du surplus d'humidité demeurent sensiblement les mêmes dans les 2 cas. Par contre, on note une diminution du taux de condensation. Une partie de cette diminution provient de l'accroissement de la température des parois internes dû aux plus forts échanges radiatifs vers ces surfaces. Mais la raison principale, c'est qu'il y a une surface de moins au rez-de-chaussée pour condenser l'eau contenue dans l'air; soit le mur nord lui-même.

Globalement, on devrait isoler le mur nord si la diminution du rendement des plants de tomates, due aux plus faibles gains solaires, est moins importante que les économies de chauffage.

Comme dernière modification des paramètres fixes, il est souvent envisagé de **regrouper les serres ensemble** pour réduire la surface exposée à l'environnement externe. La figure C.4 compare la consommation énergétique de 4 serres jumelées à celle de 4 serres standards séparées les unes des autres. Le fait de regrouper les 4 serres ensemble réduit la surface résultante des parois du rez-de-chaussée de 60 %. Si on suppose que les infiltrations au niveau du rez-de-chaussée sont proportionnelles à la surface des parois externes (tout comme c'est le cas pour les pertes par convection), alors le fait de regrouper les serres ensemble réduit les besoins de chauffage annuels de 31 %. Par contre, si on considère que le taux d'infiltration ne diminue pas en regroupant les serres, l'économie de chauffage tombe à 18 %. Selon le C.R.E.A.Q., le taux d'infiltrations ne semble pas être réduit par le regroupement de serres [6]. Par conséquent, le gain de chauffage réel devrait se situer quelque part entre 18 et 31 %. Dans le jumelage de serres, ce qui limite la réduction des déperditions thermiques sont les entre-toits. En effet, la surface totale de ces derniers demeure la même quel que soit le type d'arrangement (serres jumelées ou séparées). Dans le cas des serres séparées, la surface des entre-toits représente 59 % de la surface totale exposée, alors que ce taux atteint 78 % dans le cas des 4 serres jumelées; soit 19 % de plus.

Alors, pour réduire un peu plus les déperditions thermiques des serres jumelées, il est d'usage d'isoler entièrement le mur nord. Cela n'affecte pas beaucoup les gains solaires puisque la surface du mur nord ne représente que 5.4 % de la surface totale exposée et elle est du côté opposé au soleil. Son effet isolant se fait surtout sentir la nuit lorsque la toile thermique est déployée; ce qui réduit de beaucoup les surfaces exposées.

### 5.3.2 Modification des paramètres non fixes

Habituellement, le **type de culture** constitue l'un des paramètres que l'on peut changer à l'intérieur d'une serre. Par contre, le choix d'une culture est basé sur son potentiel commercial et aussi sur les connaissances que le serriculteur possède à son égard. Malgré tout, du point de vue économie d'énergie, le choix de l'espèce devrait se faire en fonction de l'abondance du feuillage. En effet, à la section 3.2.3 on a vu que l'évapotranspiration est

directement proportionnelle à la surface du feuillage des plantes par unité de surface du plancher (LAI). On a donc avantage à choisir les espèces qui ont le plus petit feuillage possible. En réalité, le LAI demeure assez élevé d'une culture à l'autre, car on cherche toujours à maximiser l'espace disponible dans la serre. Les petites plantes, même si elles ont un plus petit feuillage, sont beaucoup plus entassées les unes sur les autres pour finalement donner un LAI équivalent aux grandes plantes. Par contre, pour un même LAI, une petite plante de 0.1 à 0.3 m de haut captera moins de rayonnement qu'une grande plante s'étendant sur 2 m de haut. Le tableau ci-dessous, donne quelques exemples de densité de feuillage.

TABLEAU 5.1 DENSITÉ DE FEUILLAGE POUR DIVERSES CULTURES

Type de culture (mature)	LAI (m <sup>2</sup> de feuillage par m <sup>2</sup> de plancher)	[référence]
Tomate	≈ 3 (2 à 4.5)	[44 et 39]
Concombre	≈ 2	[47]
Bégonia	≈ 2.7	[58]
Impatiente	≈ 5.1	[58]

La **période de l'année** fait également partie des choix que le serriculteur peut modifier facilement. D'ailleurs, c'est un choix important à faire puisqu'il a une forte influence sur la consommation énergétique. En effet, la figure C.5 montre que le fait de produire 2 cultures hâtives (1<sup>er</sup> janvier au 30 juin; 1<sup>er</sup> juillet au 31 décembre) au lieu de 2 cultures tardives (15 mars au 31 juillet; 1<sup>er</sup> août au 15 décembre), fait accroître la consommation énergétique annuelle de 63 %.

L'emploi d'une **toile imperméable blanche** et étanche à 90 % peut être une solution efficace lorsque l'on veut accroître le rendement des plantes. En effet, la figure C.6a nous montre que les gains solaires du mur de plants de tomates augmentent en moyenne de 36 %

dus à la faible absorptivité lumineuse du sol ainsi recouvert. Par contre, avec un tel accroissement des gains solaires, on devrait s'attendre à une forte augmentation de l'évapotranspiration. Mais, ce n'est pas ce que le graphique qui illustre l'évapotranspiration et l'évaporation à la surface du sol nous montre. En fait, on n'obtient qu'une augmentation moyenne de 5.3 %. Ce qui explique cela, c'est le même phénomène que celui qui se produit lorsque l'on isole le mur nord (voir ci-haut). Le sol recouvert d'une toile blanche absorbe moins de rayonnement solaire et devient moins chaud que si c'était de la terre de couleur sombre. Par conséquent, le sol émet moins de rayonnement infrarouge long sur les plantes, ce qui fait diminuer l'évapotranspiration. C'est d'ailleurs ce que l'on constate en regardant le graphique du bilan radiatif (figure C.6b).

Lors de leurs premières utilisations, les toiles sur le sol avaient pour principale fonction de réduire le taux d'évaporation à la surface du plancher. Le graphique «Évaporation» de la figure C.6a montre qu'elles s'acquittent bien de leur tâche. Globalement, la réduction moyenne du taux d'évaporation est de l'ordre de 16.2 %, en tenant compte du 5.3 % d'augmentation de l'évapotranspiration.

Cette réduction se traduit par une diminution moyenne de 10.3 % des pertes dues à la ventilation du surplus d'humidité (figure C.6b). Par contre, on obtient quand même une augmentation moyenne de 4.1 % des besoins de chauffage (figure C.6c). Cela est dû aux plus grandes pertes de rayonnement solaire que la toile blanche sur le sol réfléchit à l'extérieur de la serre.

#### **5.4 Effet de la région choisie**

Dans cette section, on vérifie si le fait d'implanter une serre standard à Montréal, à La Pocatière, ou à Sept-Îles modifie beaucoup le surplus de chaleur solaire que l'on peut capter. Les figures C.7a à C.7c de l'annexe C montrent, sur une base horaire, le bilan de chauffage saisonnier d'une serre standard pour chacune des 3 régions. Pour chaque mois, on remarque qu'il y a des pointes de consommation énergétique au lever et au coucher du soleil. Il y a 2

raisons qui expliquent ce phénomène. La première raison est qu'au lever du soleil, on doit faire passer la température à l'intérieur de la serre de 13 °C à 22.5 °C; ce qui requiert une forte demande énergétique. Par la suite, le soleil commence à chauffer l'intérieur de la serre, de même que l'air extérieur. Dans ces conditions, la demande énergétique diminue pour atteindre un minimum vers 12h00 et 13h00. Par contre, dans l'après-midi, l'apport énergétique du soleil devient de moins en moins important jusqu'à une valeur négligeable au crépuscule. À ce moment, on obtient de nouveau une pointe de consommation énergétique. Immédiatement après, on fait décroître la température à l'intérieur de la serre de 22.5 °C à 13 °C; ce qui fait réduire la demande de chauffage pour la nuit. La capacité thermique de la serre et la température externe qui est généralement plus élevée en soirée font en sorte que la deuxième pointe de chauffage est toujours plus faible que la première. Il faut noter que la largeur des pointes de chauffage est beaucoup moins importante que celle qui apparaît sur les figures. En effet, ces dernières sont obtenues en effectuant une moyenne sur un mois, alors que le moment du lever et du coucher du soleil change continuellement. Par conséquent, les pointes de chauffage ne se superposent pas, mais s'étalent dans le temps.

En regardant de près les différentes courbes de la saison d'hiver, il arrive parfois que la consommation énergétique soit plus importante en décembre qu'en janvier. La raison à cela est que la deuxième culture se termine le 15 décembre, alors qu'il n'y a aucune culture pour consommer de l'énergie entre le premier janvier et le 15 mars.

Globalement, les résultats des figures C.7a à C.7c montrent que l'on peut espérer récupérer et stocker de l'énergie solaire selon certaines périodes de l'année. Pour chacune des 3 villes, ces périodes sont:

Montréal	mi-mars à fin septembre
La Pocatière	début mars à fin septembre
Sept-Îles	mi-avril à mi-septembre

Les résultats calculés pour La Pocatière sont conformes à ceux obtenus expérimentalement par Bernier [3]. De plus, on peut remarquer qu'au début du printemps, les serres qui seraient établies à La Pocatière consommeraient moins d'énergie que celles à Montréal, malgré que la température extérieure à La Pocatière y soit moins élevée. La raison est que le vent et surtout l'«ennuagement» sont plus importants à Montréal pendant cette période (voir figure 2.2). Dans le cas de Sept-Îles, on note que l'on peut récupérer de l'énergie pendant les mois d'avril et de septembre. Par contre, l'amplitude de l'énergie récupérée est faible par rapport à celle des 2 autres villes. C'est la raison pour laquelle on ne spécifie que la moitié des ces mois (mi-avril et mi-septembre).

La figure C.7d de l'annexe C indique, pour chaque ville, le moment de l'année auquel une serre pourrait récupérer suffisamment d'énergie solaire pour se chauffer durant toute la nuit. C'est au printemps que les écarts entre les villes sont les plus importants. À Sept-Îles, le moment où il y aurait autosuffisance énergétique arrive environ 5 à 6 semaines plus tard qu'à Montréal et se termine environ 3 semaines plus tôt. De plus, On note que les surplus énergétiques sont faibles à la fin de la première culture pour la ville de Sept-Îles.

Finalement, l'automne semble faire décroître beaucoup plus rapidement l'efficacité énergétique des serres qu'au printemps. Le plus faible rayonnement solaire au troisième trimestre est une des raisons, mais la plus forte évapotranspiration est à considérer également. En effet, au printemps, on a de petits plants de tomates qui deviennent matures à l'été. Par contre, lors de la deuxième culture, les plants deviennent matures à la fin de l'automne, là où la ventilation du surplus d'humidité est coûteuse du point de vue énergétique.

## 5.5 Améliorations simples et peu coûteuses

Une façon de réduire les coûts de chauffage consisterait à installer en permanence une **pellicule de plastique transparente** entre le rez-de-chaussée et l'entre-toit. Cette pellicule agirait comme une toile thermique durant le jour, alors que pendant la nuit, la vraie toile

thermique, qui est mieux isolée, se hisserait par-dessus cette pellicule. Les pellicules moulantes sont très communes dans l'industrie de l'emballage et surtout peu coûteuses. Leur résistance thermique est faible ( $0.147 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ), mais elles offrent une bonne transmission lumineuse (92 à 93 %) et une bonne résistance mécanique.

La figure C.8 à l'annexe C montre les résultats obtenus lorsqu'une serre standard est munie d'une pellicule moulante en permanence. Ce système permettrait de réduire de 15.2 % les besoins de chauffage annuels. Par contre, cette baisse de chauffage s'accompagnerait d'une baisse annuelle de 6.5 % des gains solaires reçus par les plantes (4.9 % pendant l'hiver). De plus, on note que l'on ne devrait pas avoir de problèmes de condensation sur cette pellicule. Les plus forts taux surviendraient à la fin de l'automne et seraient faibles comparés à ceux sur les côtés et le toit de la serre.

Une autre façon de réduire la consommation énergétique serait de **préchauffer l'air** que l'on fait entrer dans la serre pour ventiler le surplus d'humidité. Pour ce faire, on aurait qu'à faire circuler l'air externe à travers des tuyaux de 0.1 m de diamètre et de 10 à 15 m de long enfouis à environ 1.75 m dans le sol à l'extérieur de la serre [59]. Par temps froids, la température de l'air externe est souvent plus basse que celle du sous-sol, surtout à l'automne, après que la terre ait capté une grande quantité de chaleur à l'été. C'est donc la chaleur du sous-sol qui préchaufferait l'air de la ventilation de l'humidité. De plus, on pourrait envisager d'évacuer l'air chaud et humide de la serre à travers d'autres tuyaux situés près de ceux qui préchauffent l'air externe. De cette façon, on éviterait que la température locale du sous-sol devienne trop basse par l'apport continu d'air froid. Malheureusement, TRNSYS ne permet pas d'évaluer la conduction tridimensionnelle dans le sol. Il n'est donc pas possible d'inclure ce système au modèle afin d'évaluer son efficacité. Par contre, cela deviendra possible lorsque l'on combinera le présent modèle avec le code BIKO de la phase II du projet ÉCHAS. En effet, le code BIKO est conçu pour évaluer les transferts de chaleur dans le sol par l'intermédiaire de tuyaux qui y sont enfouis. Néanmoins, même si on n'a pas

déterminé de performance, ce préchauffeur d'air est techniquement simple à réaliser et peu coûteux.

Finalement, les différentes simulations présentées dans ce chapitre ont permis de déterminer les paramètres les plus «énergivores» d'une serre commerciale au Québec. De plus, on a démontré qu'une serre standard peut capter suffisamment d'énergie solaire pour pouvoir en stocker dans le sol entre le début du mois de mars jusqu'à la fin de septembre (sud du Québec). Cela signifie que le projet ÉCHAS ne serait rentable que pour les cultures tardives.



## CONCLUSION

Il a été démontré que les saisons froides au Québec rendent l'industrie serricole de la province moins compétitive face aux pays dont le climat est plus clément. Pour réduire les coûts de chauffage, beaucoup de techniques ont été développées pour stocker le surplus d'énergie solaire dans le but de le récupérer la nuit. Mais la plupart de ces technologies sont encombrantes et coûteuses. Par contre, il en existe une qui offre beaucoup de potentiel mais dont la technologie est peu développée; soit le stockage et le «déstockage» de chaleur dans le sol sous le plancher de la serre. Cela est réalisé en faisant circuler l'air de la serre à travers des tuyaux enfouis dans le sol en question. C'est dans le but de mieux connaître ce nouveau concept que le projet ÉCHAS a été créé. Ce projet est constitué de 2 sous-projets. L'un a pour objet d'étudier le stockage et le «déstockage» de chaleur dans le sol et l'autre, qui est l'objet du présent mémoire, se veut une étude du comportement thermique et massique dans le temps d'une serre commerciale typique au Québec.

La recherche bibliographique a permis de constater qu'il y avait, jusqu'à ce jour, peu d'études qui tenaient compte de façon détaillée de l'influence des plantes et de la condensation sur le bilan énergétique d'une serre. Face à la faiblesse des modèles existants et en se basant sur une serre commerciale typique au Québec, le présent projet de recherche avait comme principaux objectifs de déterminer:

- Les effets des paramètres modifiables et non modifiables sur une serre:
  - le choix du type de recouvrement;
  - le mur nord isolé;
  - le regroupement de serres;
  - l'emploi d'une toile imperméable blanche sur le sol;
  - le choix du type de plantes et le moment de la culture.
- Les effets créés par la présence des plantes:
  - la fraction de l'énergie solaire absorbée par les plantes et convertie en humidité (en fonction de leur croissance);
  - les pertes dues à la ventilation du surplus d'humidité;
  - l'effet et la fréquence d'apparition de la condensation sur le fenêtrage.

- L'énergie pouvant être stockée:
  - le surplus de chaleur que l'on doit évacuer à l'extérieur, ou bien, que l'on pourrait stocker, selon la région et le moment de l'année;
  - les modifications que l'on peut apporter pour permettre d'allonger la période de stockage.

C'est à l'aide du logiciel commercial TRNSYS que le code fut mis en oeuvre et, par la suite, validé. Les résultats des simulations et de l'analyse ont permis de tirer les conclusions suivantes:

**L'emploi du recouvrement populaire de polyéthylène** est justifiable. En effet, même s'il occasionne environ 10 % de plus de pertes thermiques que son concurrent le polycarbonate, l'économie sur le coût d'achat annualisé sur toute la durée de vie justifie son utilisation (2.4 fois moins cher). Le verre, par contre, est très «énergivore». Il engendre des coûts de chauffage 46 % plus élevés que le polyéthylène. Même s'il est environ 1.6 fois moins dispendieux sur une base annuelle, on peut conseiller son utilisation seulement si on recherche une forte transmission lumineuse pour la croissance des plantes.

**On peut isoler le mur nord** si la baisse de 18.6 % des coûts de chauffage que cela produit est inférieure à la baisse de productivité des plantes (en dollars). En effet, le mur isolé réduit de 6.3 % le rayonnement reçu par les plantes.

**Le regroupement de 4 serres** permettrait de réduire la consommation énergétique d'environ 18 % si on considère que le taux d'infiltration d'air au niveau du rez-de-chaussée est le même que pour 4 serres séparées.

**L'emploi d'une toile imperméable blanche sur le sol** est surtout utile pour augmenter la luminosité à l'intérieur de la serre (36 %). Elle permet également de réduire le taux d'évaporation total de 16.2 %, en tenant compte de l'augmentation de l'évapotranspiration (5.3 %). Par contre, la couleur blanche de la toile réfléchit beaucoup le rayonnement solaire vers l'extérieur de la serre. Globalement, cela crée une augmentation moyenne de 4.1 % des besoins de chauffage.

**Le moment de l'année auquel on veut effectuer une culture** est plus important sur le bilan énergétique que le choix du type de plantes à cultiver. Une culture hâtive requiert environ 63 % plus d'énergie de chauffage qu'une culture tardive.

**Les plantes contribuent pour environ 48 % de la consommation énergétique**, soit: 21 % par évapotranspiration, 20 % par les infiltrations naturelles auxquelles on doit ajouter 7 % par la ventilation du surplus d'humidité puisque les infiltrations ne sont pas suffisantes pour abaisser le taux d'humidité. Donc, lorsqu'il y a des plantes dans la serre, il est inutile d'essayer de réduire les infiltrations d'air à zéro puisque de toute

façon il faut évacuer le surplus d'humidité. Par contre, on doit tenter d'abaisser le taux d'infiltration à celui de la ventilation minimale du surplus d'humidité qui doit être fait la nuit.

- **La condensation** a peu d'influence sur la demande de chauffage annuelle (+ 0.4 %). En effet, même si la condensation accroît la conductance des parois, la vapeur condensée fait diminuer les besoins de ventilation du surplus d'humidité; ce qui contrebalance l'augmentation de la conductance.

**La possibilité de stocker de la chaleur dans le sol** varie peu entre la ville de Montréal et celle de La Pocatière. À ces villes, on peut espérer être en mesure de stocker de l'énergie dès les 2 premières semaines de mars jusqu'à la fin septembre. Par contre, cette période est réduite de 1.5 à 2 mois pour la ville de Sept-Îles; soit de la mi-avril à la mi-septembre. De plus, à Sept-Îles, l'ampleur des surplus énergétiques y est beaucoup plus faible.

Dans tous les cas, le système ÉCHAS ne serait efficace que pour les cultures tardives. Mais, on pourrait toujours l'utiliser pour chauffer le sol dans le cas des cultures hâtives. En effet, pendant les mois d'hiver, il est fortement conseillé de chauffer le sol pour les cultures en terre. Donc, au lieu d'utiliser un système à eau chaude, on pourrait faire fonctionner le système ÉCHAS.

Si on veut augmenter la période utile des systèmes ÉCHAS, il faudra nécessairement apporter certaines modifications à la serre. On pourrait réduire les déperditions thermiques la nuit en ajoutant des rideaux thermiques sur les murs de côté. Mais cela ne contribuerait pas à augmenter les surplus énergétiques le jour puisque l'on devrait rétracter ces rideaux. Par contre, on a démontré que l'installation en permanence d'une pellicule transparente très mince pourrait réduire la consommation énergétique d'environ 15 %. De plus, cette pellicule, qui installée sous les guides de la toile thermique, ne réduirait les gains solaires que de 4.9 % pendant les mois d'hiver. En plus de cette pellicule, il pourrait être envisagé de préchauffer l'air de ventilation d'humidité en la faisant passer à travers des tuyaux enfouis dans le sol extérieur (en hiver, ce sol est généralement plus chaud que l'air ambiant). On pourrait même faire évacuer l'air vicié à travers d'autres tuyaux qui passent près de ceux qui préchauffent l'air externe. On se servirait donc du sol comme échangeur de chaleur.

Ces 2 dernières méthodes sont des technologies connues, simples et peu coûteuses à réaliser. Par contre, une autre avenue pourrait remplacer ces 2 techniques pour réduire les déperditions thermiques d'une serre. Cette avenue est basée sur le principe du mur actif développé en Europe surtout pour les bâtiments avec peu de fenêtrage [60]. Dans le cas d'une serre, ce principe pourrait fonctionner de la façon suivante:

Tout d'abord, on sait que la double paroi de polyéthylène que constitue le recouvrement de la serre est maintenue gonflée à l'aide de ventilateurs qui fonctionnent en permanence. Le principe recherché est d'utiliser de plus gros ventilateurs dans le but de maintenir la toile gonflée et en plus, d'effectuer la ventilation du surplus d'humidité en faisant pénétrer le surplus d'air à l'intérieur de la serre. Ce surplus d'air entrerait dans la serre en passant à travers de petits trous dans la toile intérieure du recouvrement. Donc, avant d'entrer dans la serre, l'air capterait une partie des pertes de chaleur qui circulent normalement de la toile interne vers la toile externe.

Ce principe est théoriquement intéressant, sauf qu'il nécessiterait une étude numérique approfondie pour bien comprendre les mouvements de convection et les échanges thermiques qu'il y a entre les 2 toiles non équidistantes d'un endroit à l'autre. Seulement ce genre d'étude permettrait de déterminer la ou les dimensions des perforations sur la toile intérieure, la distance entre les trous et la façon dont on devrait distribuer l'air entre les 2 toiles sur toute la longueur de la serre.

Finalement, les résultats de la présente recherche ont démontré que le système ÉCHAS n'est actuellement rentable que pour les cultures tardives. Ce projet n'en demeure pas moins intéressant puisque c'est cette façon de cultiver qui est la plus répandue au Québec [1]. Le présent modèle est donc prêt à être utilisé en relation avec le code numérique BIKO de la phase II du projet ÉCHAS. Les prochaines études nous permettront d'évaluer en détail la performance d'un échangeur-accumulateur de chaleur dans le sol d'une serre.

## **ANNEXES**

## Annexe A

### Variations climatiques à la ville de La Pocatière

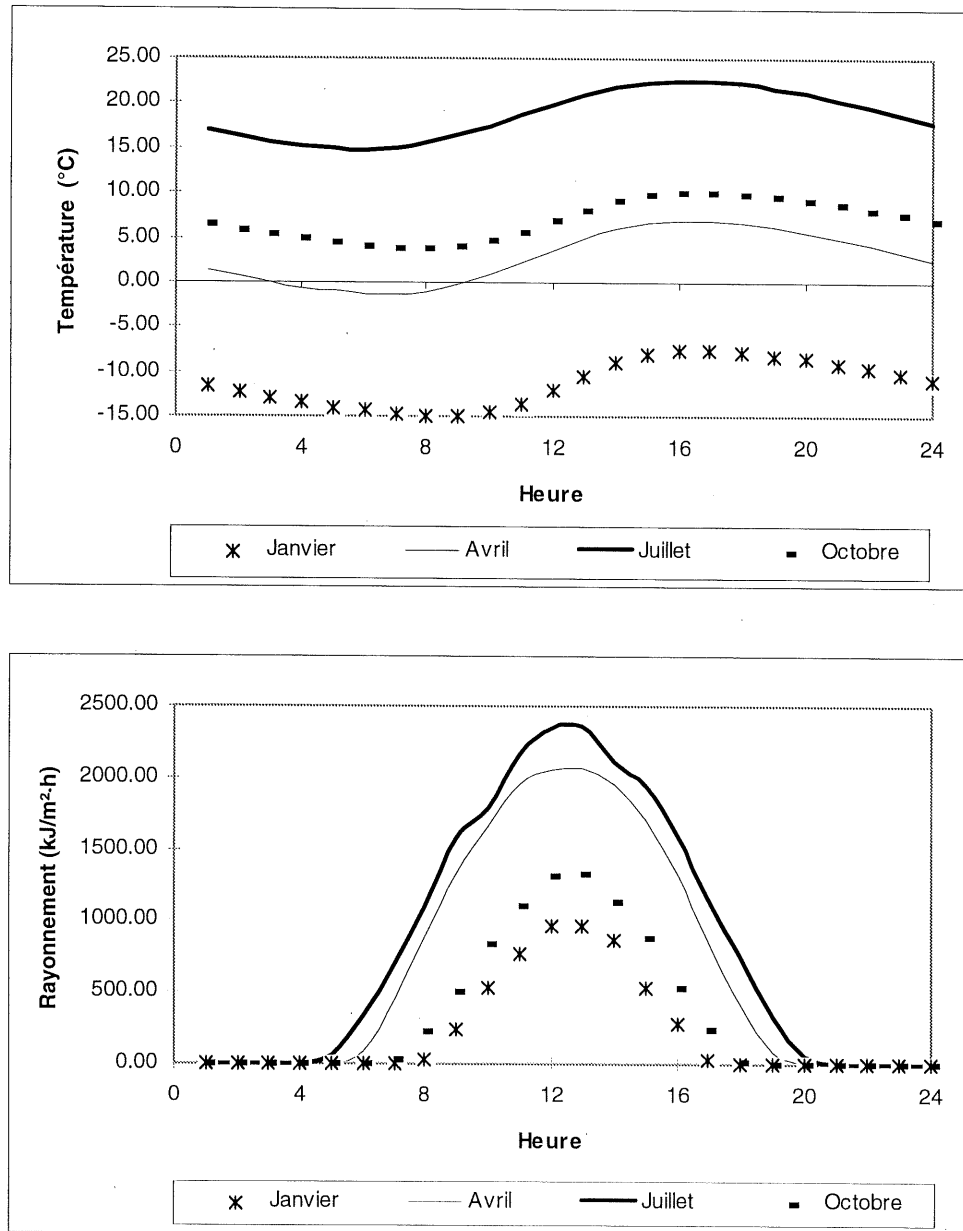


Figure A.1 Variations horaires mensuelles moyennes de la température sèche et du rayonnement solaire à la ville de La Pocatière

## Annexe B

TABLEAU B.1 COEFFICIENTS D'INFILTRATION D'AIR POUR L'ÉQUATION (3.6)

Type de construction (étanchéité)	$K_1$	$K_2$	$K_3$	Description
	$h^{-1}$	$h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	$h^{-1} \cdot (m/s)^{-1}$	
Grande	0.10	0.011	0.034	Nouvelle construction avec des précautions spéciales pour prévenir les infiltrations.
Moyenne	0.10	0.017	0.049	Construction conventionnelle.
Faible	0.10	0.023	0.07	Vieille construction
Valeurs choisies	3.8	0.017	0.52	Voir note ci-dessous
Note:	<p>Ces valeurs ont été obtenues en étalonnant le modèle sur les résultats expérimentaux effectués par Hervé Bernier à la serre de La Pocatière [3]. Il avait remarqué que les infiltrations étaient beaucoup plus importantes qu'en théorie. C'est d'ailleurs ce que l'étalonnage du présent modèle nous montre. En effet, les résultats expérimentaux indiquent que les déperditions thermiques varient de façon linéaire avec la vitesse du vent. On sait que <math>h_{e,o}</math> (voir sous l'équation (3.8)) fait varier la conductance de la paroi de façon asymptotique au lieu de linéaire: <math>1/(h_{e,o}^{-1} + U_{fenêtre}^{-1} + h_{e,i}^{-1})</math>. Cela prouve que l'on est bel et bien en présence d'infiltrations et non d'une variation de la conductance des parois due au vent. De plus, ces infiltrations ne sont pas dues au différentiel de température, car <math>K_2</math> fait varier de façon quadratique <math>\dot{M}_{inf}</math> (voir équation (3.5) et (3.6)). Par conséquent, seul le terme <math>K_3</math> peut être mis en cause avec l'ordonnée à l'origine <math>K_1</math>.</p> <p>Les infiltrations sont probablement dues au manque d'étanchéité des grands panneaux d'aération sur le toit et au ventilateur qui contrôle l'humidité. Les ventilateurs de refroidissement de la serre, quant à eux, sont calfeutrés en hiver. Le terme <math>K_1</math> signifie que la serre subit 3.8 changements d'air par heure au minimum. Pour une serre bien calfeutrée, la norme est d'environ 0.5 à 1.5 [5]. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles suggérées par TRNSYS dans le présent tableau. La raison est que les valeurs de TRNSYS sont surtout employées pour modéliser des maisons. On sait que la plupart des maisons sont subdivisées en plusieurs zones par des murs qui nuisent à la libre circulation de l'air et de la chaleur. Les serres, quant à elles, n'ont généralement qu'une seule zone. De plus, elles n'ont pas de plafond étanche comme les maisons pour empêcher l'«effet cheminée» à travers les interstices des trappes d'aération sur le toit.</p>			

TABLEAU B.2 COEFFICIENTS DE LA FONCTION DE TRANSFERT POUR UN MUR DE TÔLE ISOLÉ AVEC 76 MM DE POLYURÉTHANE

	b	c	d
J	$\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$	$\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$	---
0	0.4445234	1.7777670	1.0000000
1	0.5134513	-0.8183514	-0.0485311
2	0.0106013	0.0091606	0.0000012
3	0.0000003	-0.0000001	
$\Sigma$	0.9685763	0.9685764	0.9514701
Conductance du mur isolé: $U=1.01798 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$			
Note:	$U=1.01798 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ est équivalent à $U=1.09704 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , mais avec la composante radiative. En effet, TRNSYS traite séparément les échanges convectifs et radiatifs.		

TABLEAU B.3 COEFFICIENTS DE LA FONCTION DE TRANSFERT POUR LE MUR QUI REPRÉSENTE LE PLANCHER DE LA SERRE

	b	c	d
J	$\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$	$\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$	---
0	0.3586867E-6	8.374957	1.000000
1	0.2456268E-3	-15.37977	-1.788527
2	0.2121050E-2	8.204350	0.9231235
3	0.2357301E-2	-1.245098	-0.1339948
4	0.4747439E-3	0.5135353E-1	0.5199947E-2
5	0.1664545E-4	-0.5806597E-3	-0.5053743E-4
6	0.7705920E-7	0.8008523E-6	
$\Sigma$	0.5215804E-2	0.5216168E-2	0.5751145E-2
Conductance du mur de terre: $U=0.90691 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ( $U=0.974 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ avec la composante radiative)			



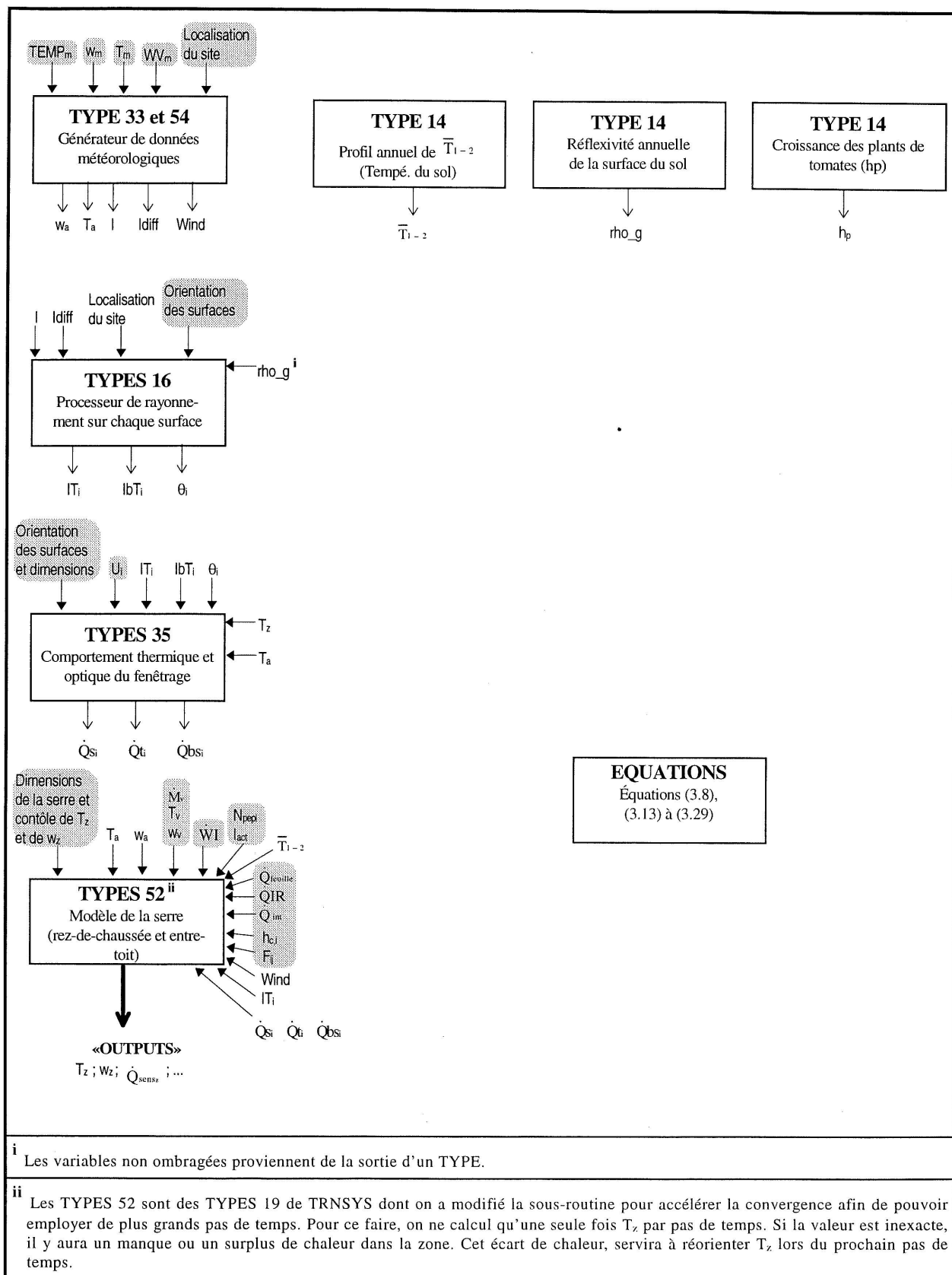


Figure B.1 Schéma d'une simulation dans TRNSYS

## Annexe C

La présente annexe contient les résultats de l'analyse paramétrique du chapitre 5. Il faut noter qu'un besoin de chauffage est défini par une valeur négative alors que les surplus d'énergie sont positifs. Cette façon de faire permet de mieux comparer le profil des sources de pertes d'énergie avec les besoins de chauffage, car ils se retrouvent tous du côté négatif sur les graphiques. De plus, il faut noter que les résultats sont obtenus sous forme de moyennes mensuelles de façon à éviter les fluctuations journalières. Pour mieux visualiser ces résultats, le logiciel de visualisation a effectué un lissage entre chacune de ces moyennes. Par conséquent, les courbes qui relient le mois de juillet au mois d'août ne sont là qu'à titre de continuité car en réalité il y a passage de la 1<sup>re</sup> à la 2<sup>e</sup> culture entre le 31 juillet et le 1<sup>er</sup> août. Ce passage se fait donc en une journée et non sur un mois.

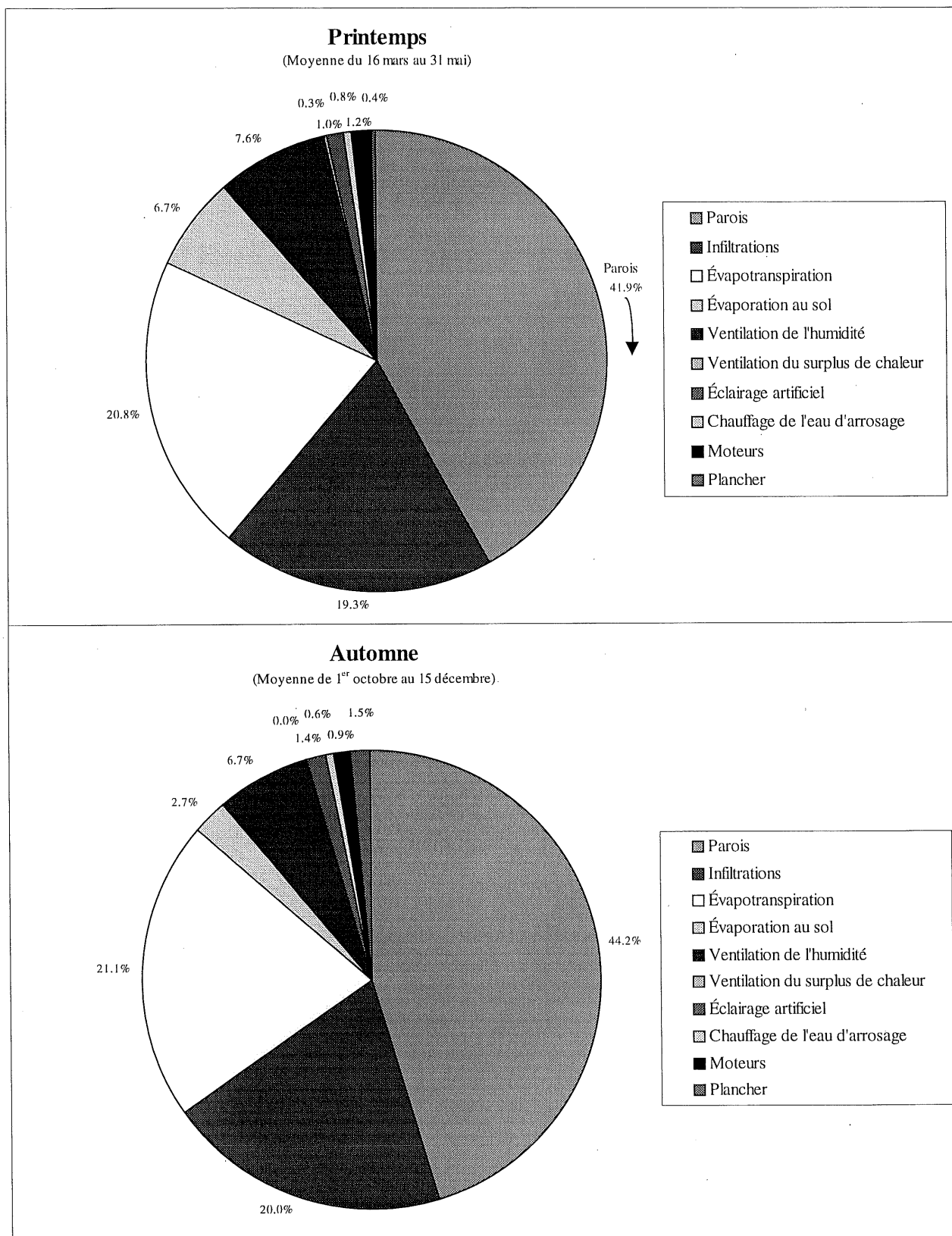


Figure C.1a Répartition de la consommation énergétique dans une serre standard

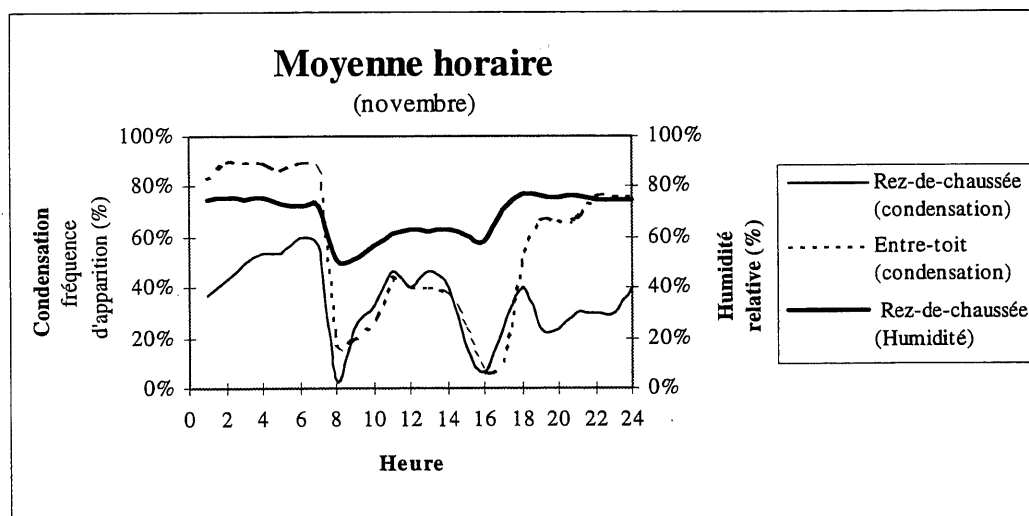
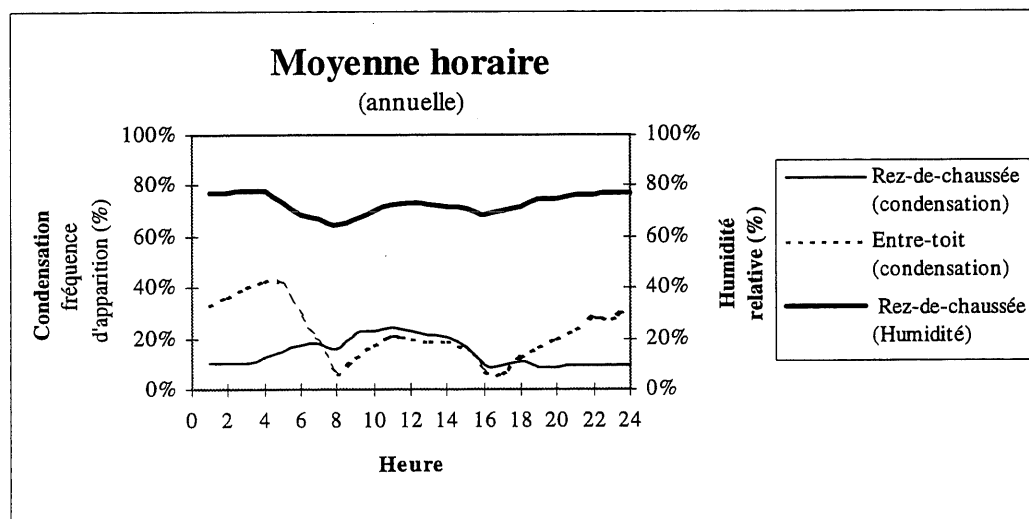
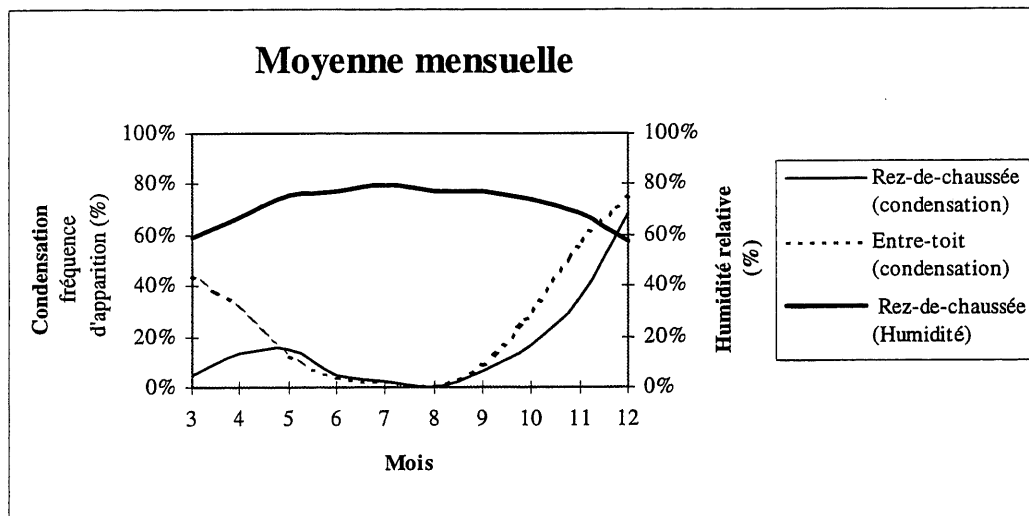


Figure C.1b Fréquence d'apparition de la condensation et taux d'humidité dans une serre standard (voir la note à la page suivante)

Notes sur la figure C.1b: Les variations du taux de condensation et d'humidité sont provoquées par les variations de température et de l'évapotranspiration dans la serre. À l'aube, la température du rez-de-chaussée passe de 13 à 22.5 °C, ce qui réduit l'humidité relative et le taux de condensation. Par la suite, l'évapotranspiration fait accroître le taux d'humidité pour finalement décroître à la fin de l'après-midi. Au coucher du soleil, la température du rez-de-chaussée repasse de 22.5 à 13 ° C, ce qui fait augmenter l'humidité relative de l'air et le taux de condensation. Pendant la nuit, le taux d'humidité demeure élevé car l'écart avec celui de l'extérieur est plus faible. Donc, les infiltrations ont moins d'effet sur la diminution de l'humidité interne.

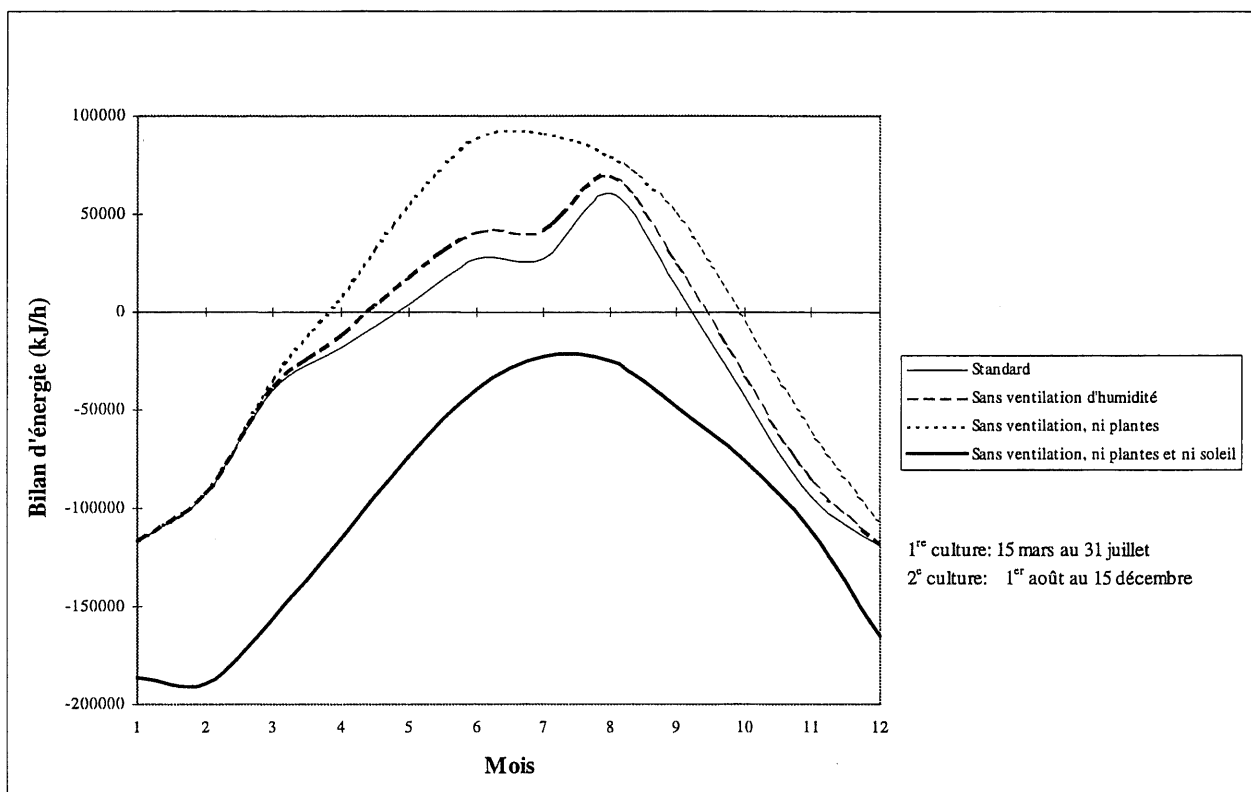


Figure C.1c Importance des plantes dans le bilan énergétique

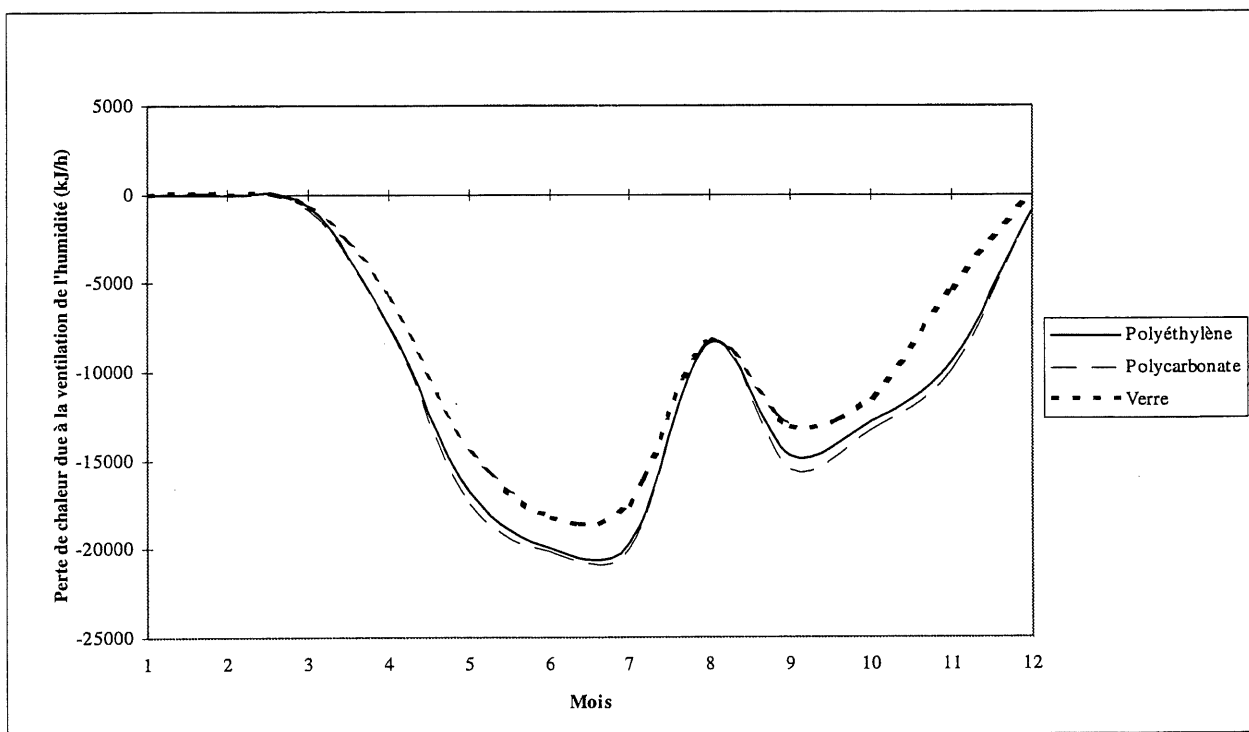
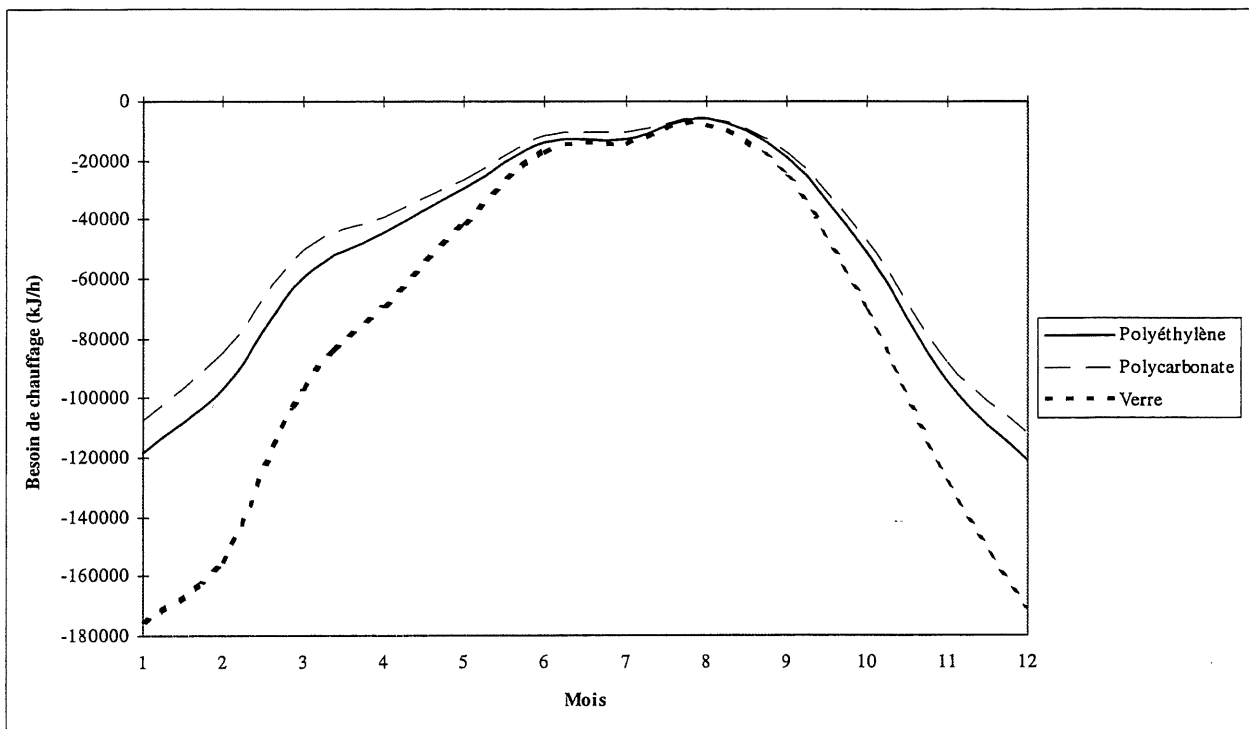


Figure C.2a Effets créés par différents types de recouvrement

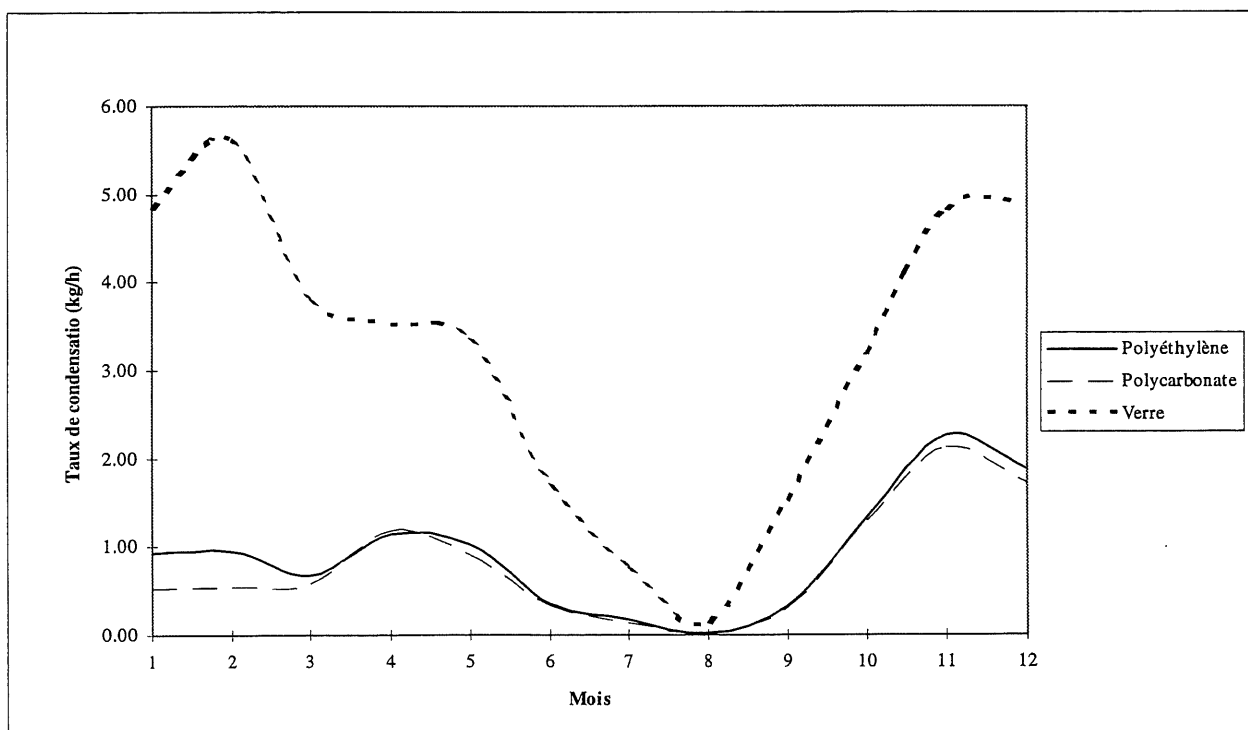
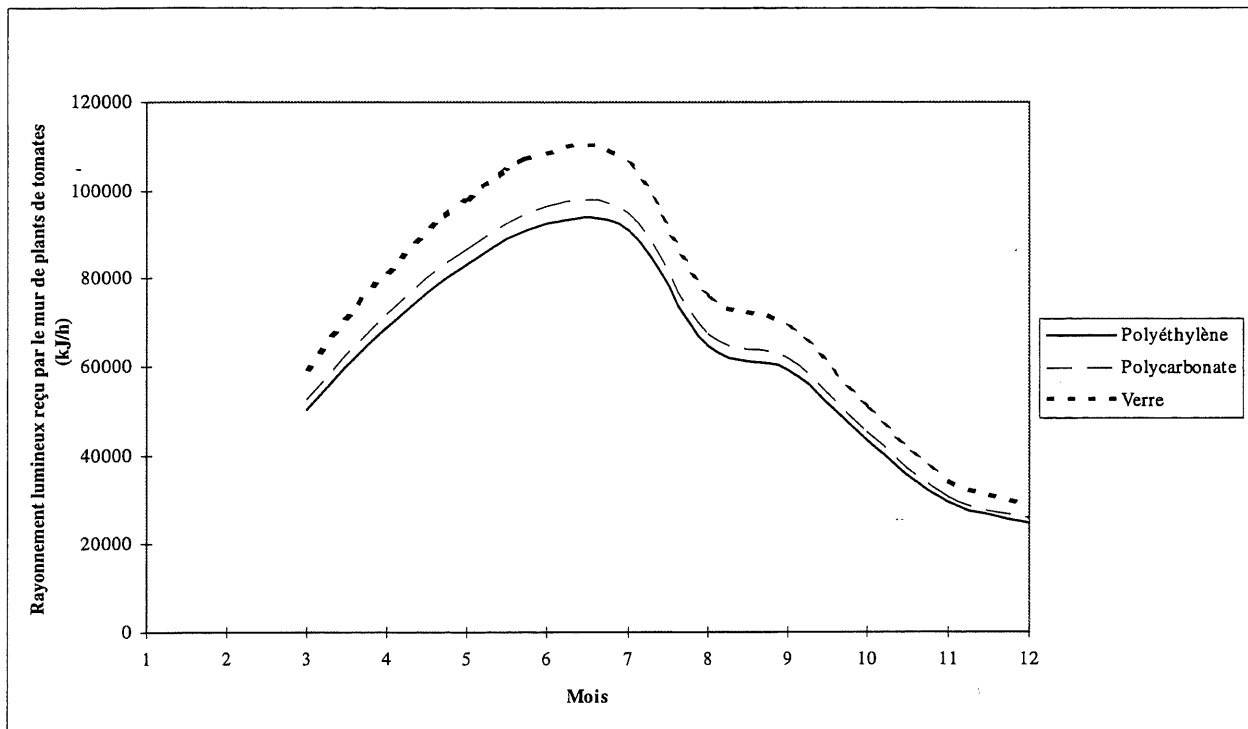


Figure C.2b Effets créés par différents types de recouvrement

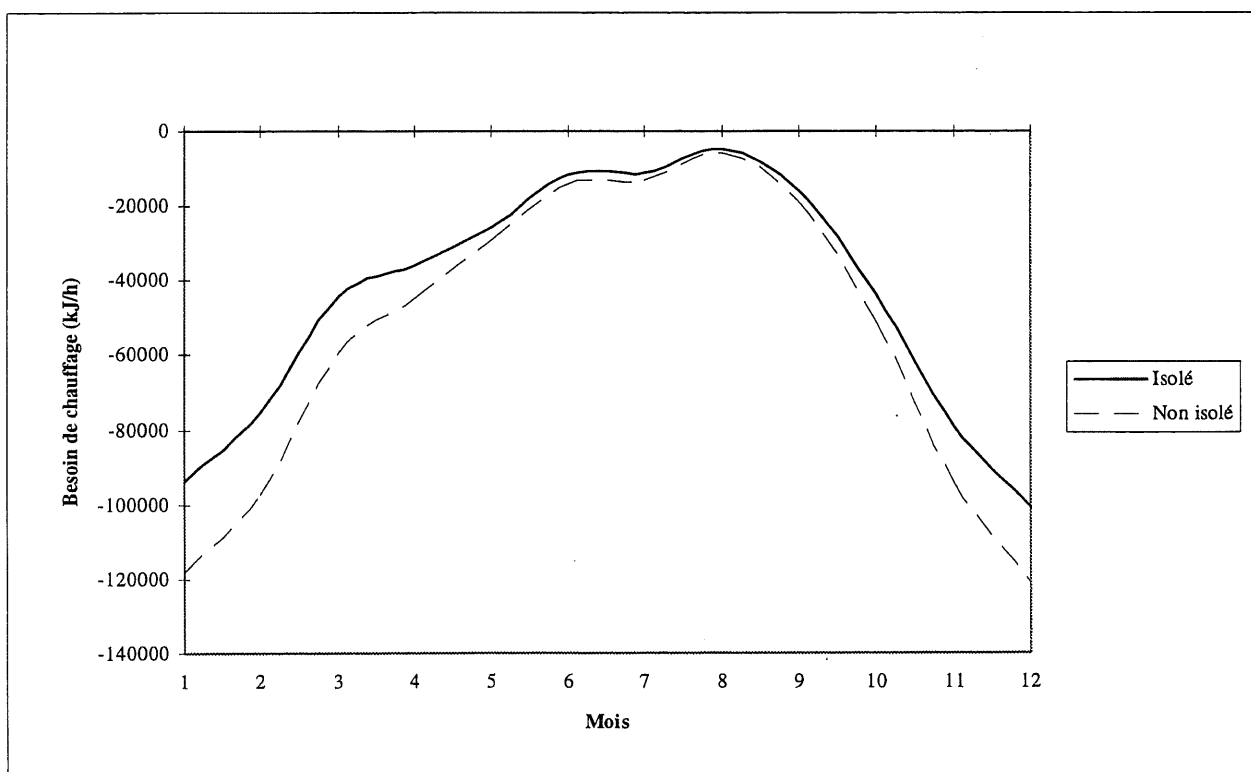
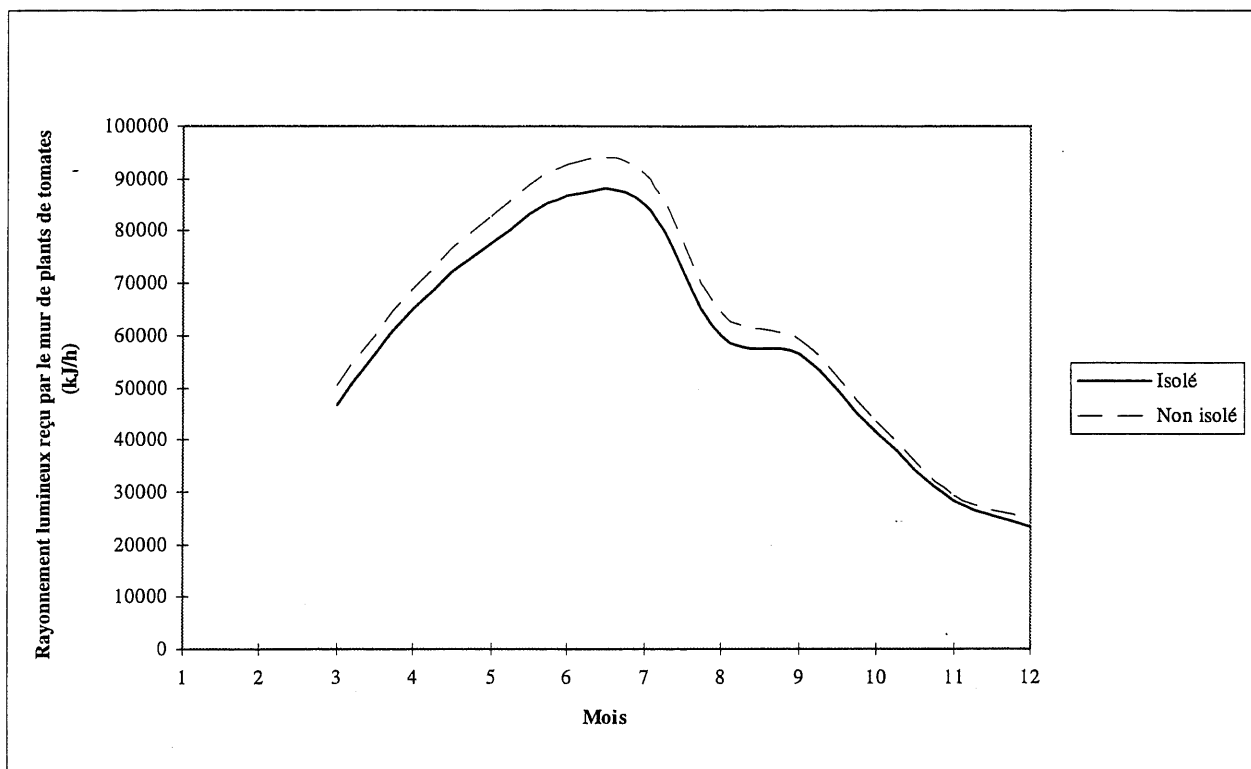


Figure C.3a Effets créés par l'isolation du mur nord



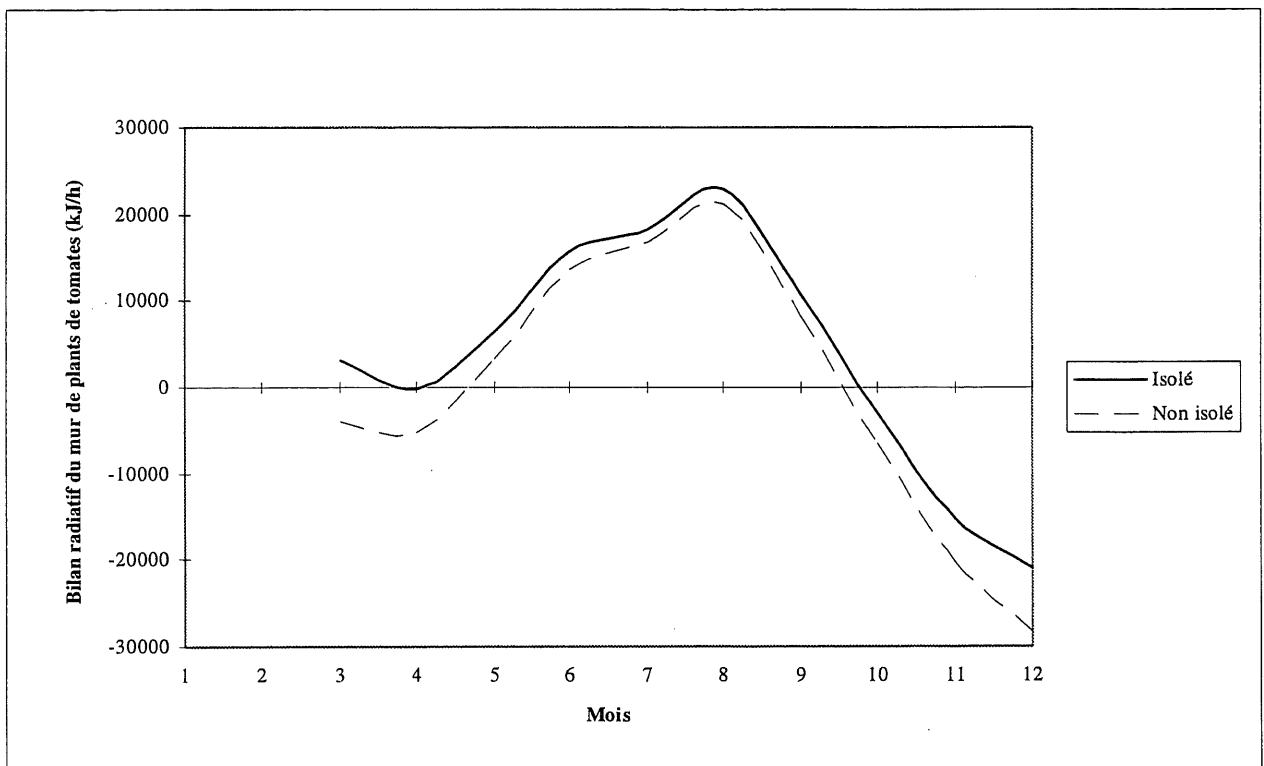
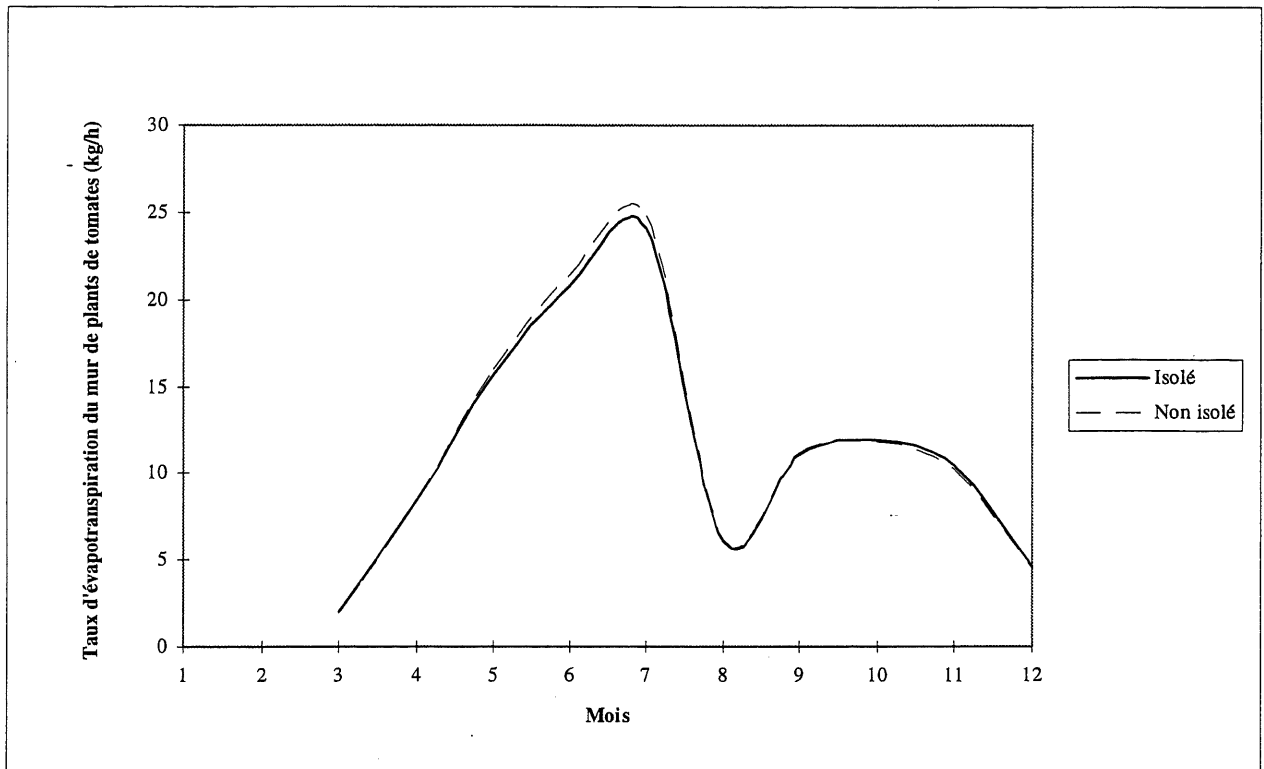


Figure C.3b Effets créés par l'isolation du mur nord

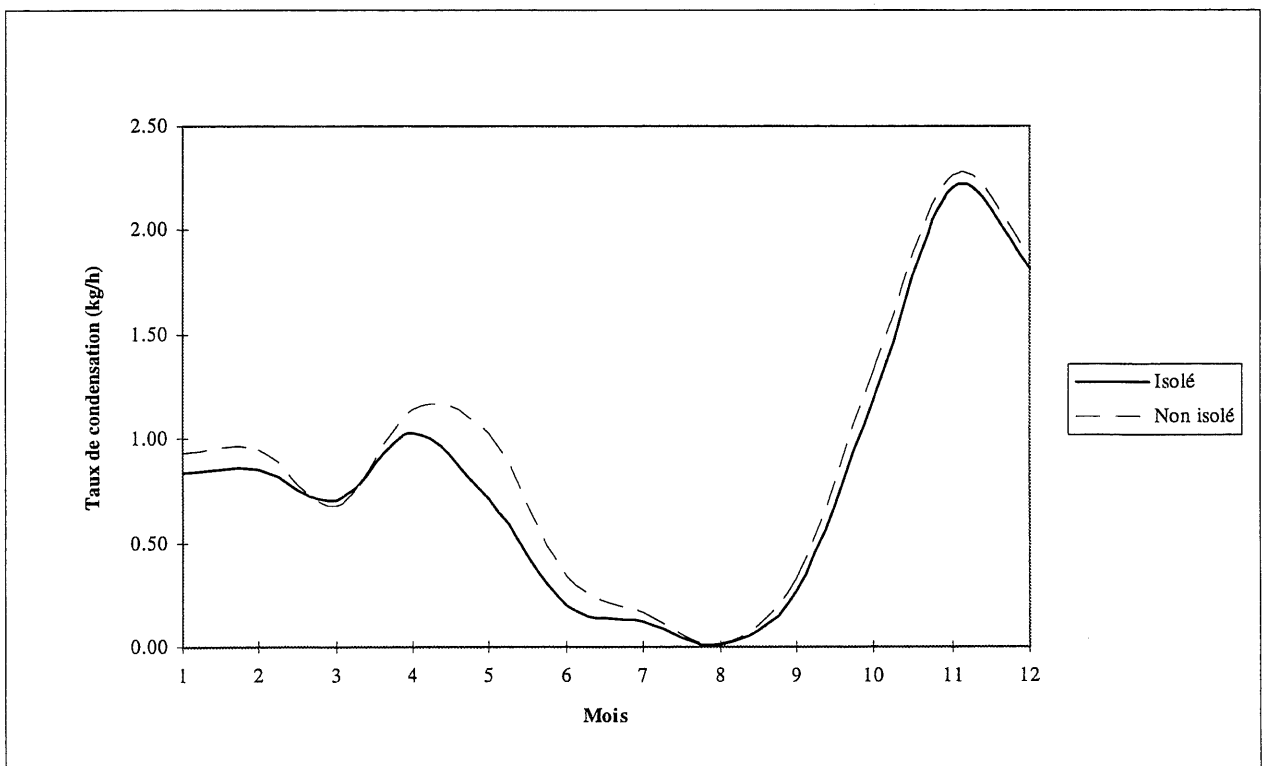
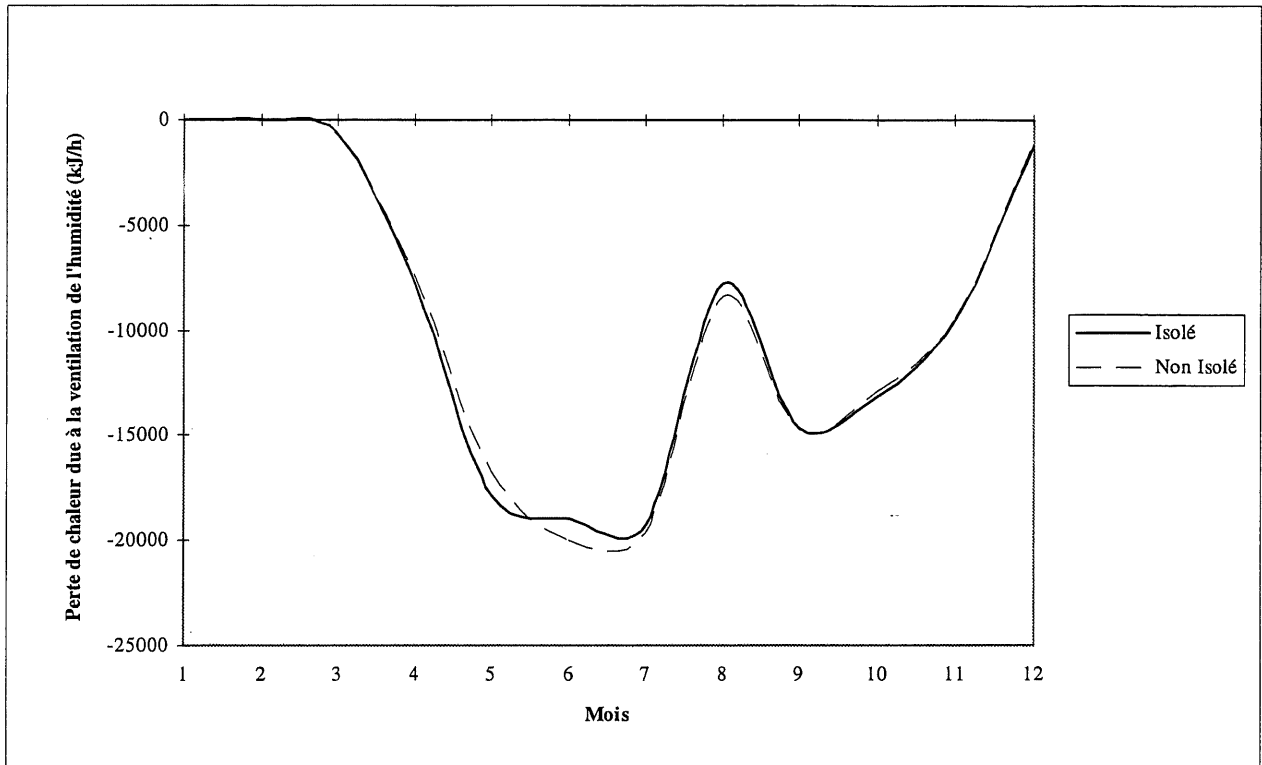


Figure C.3c Effets créés par l'isolation du mur nord

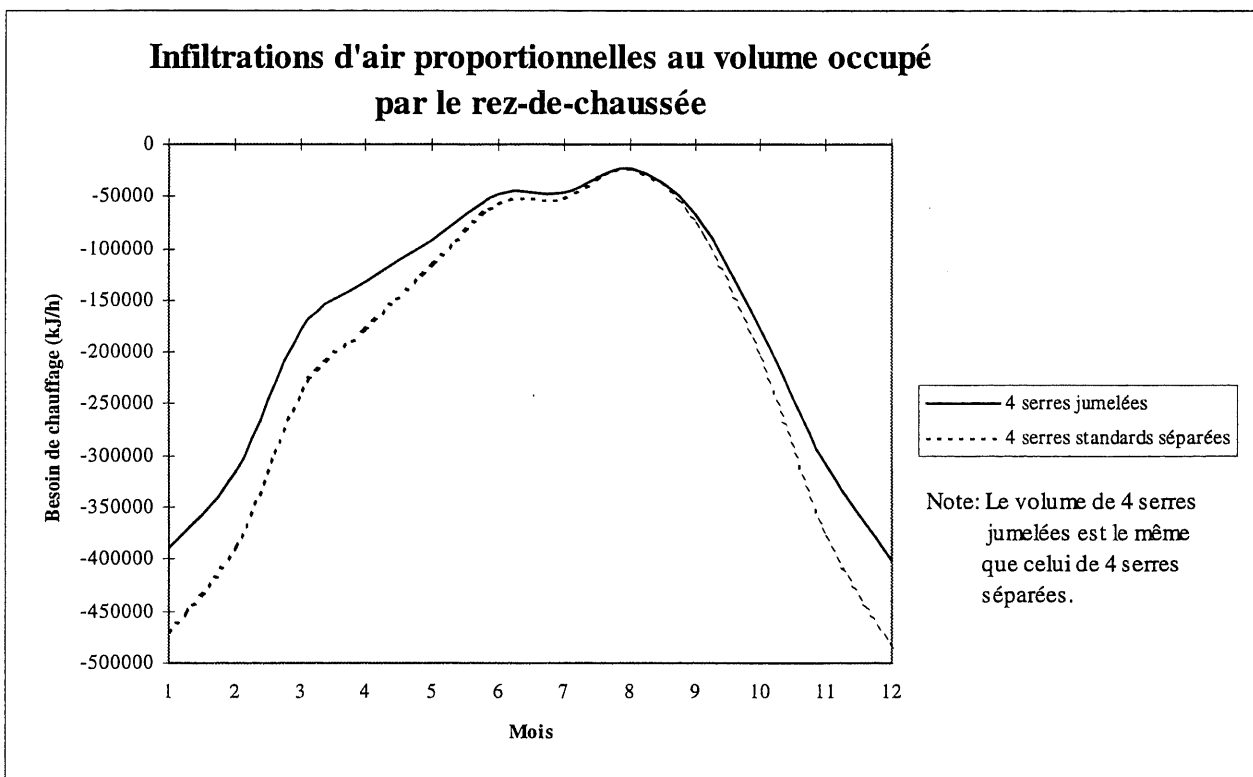
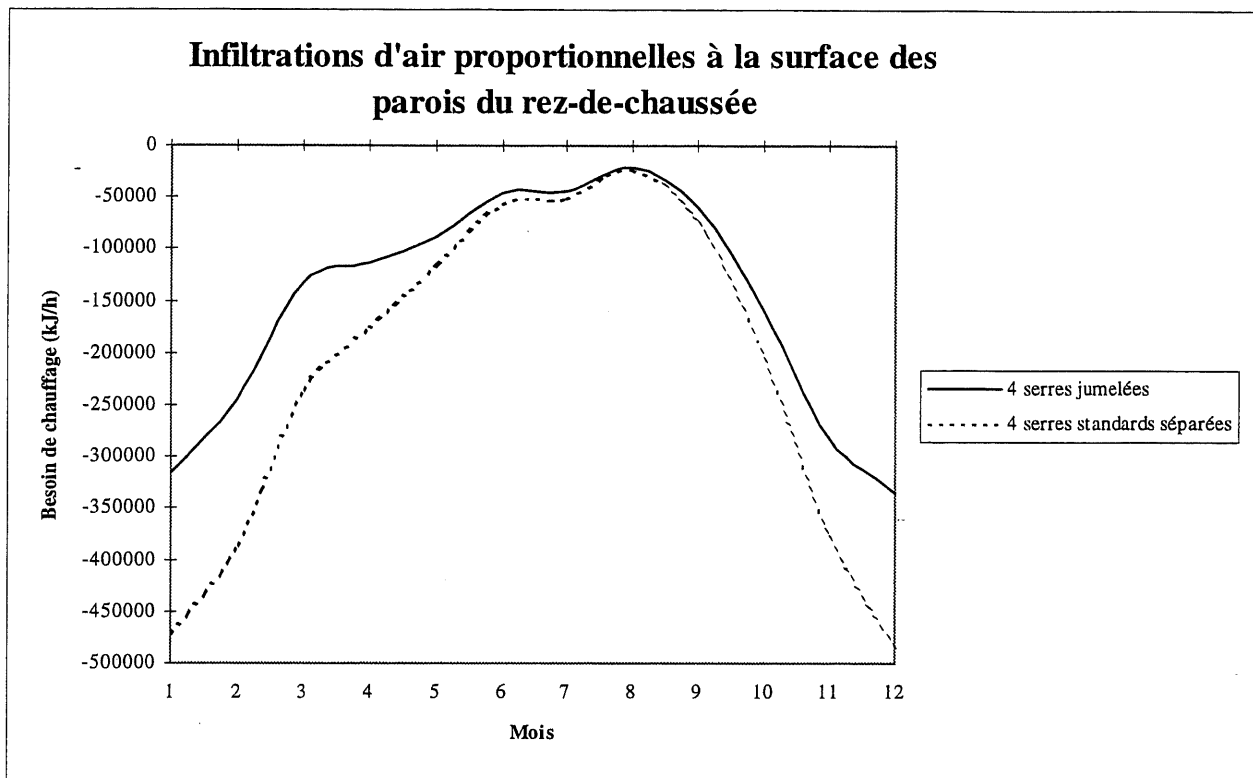


Figure C.4 Effets créés par le regroupement de serres

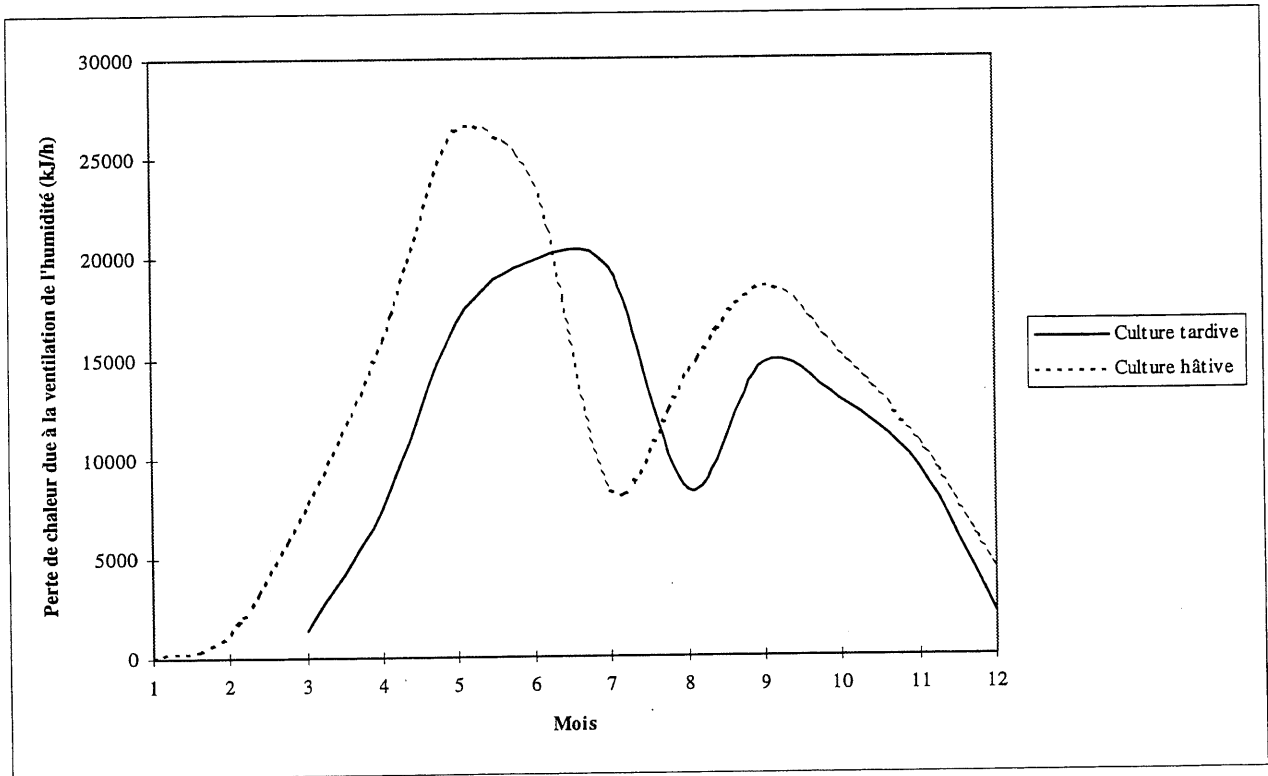
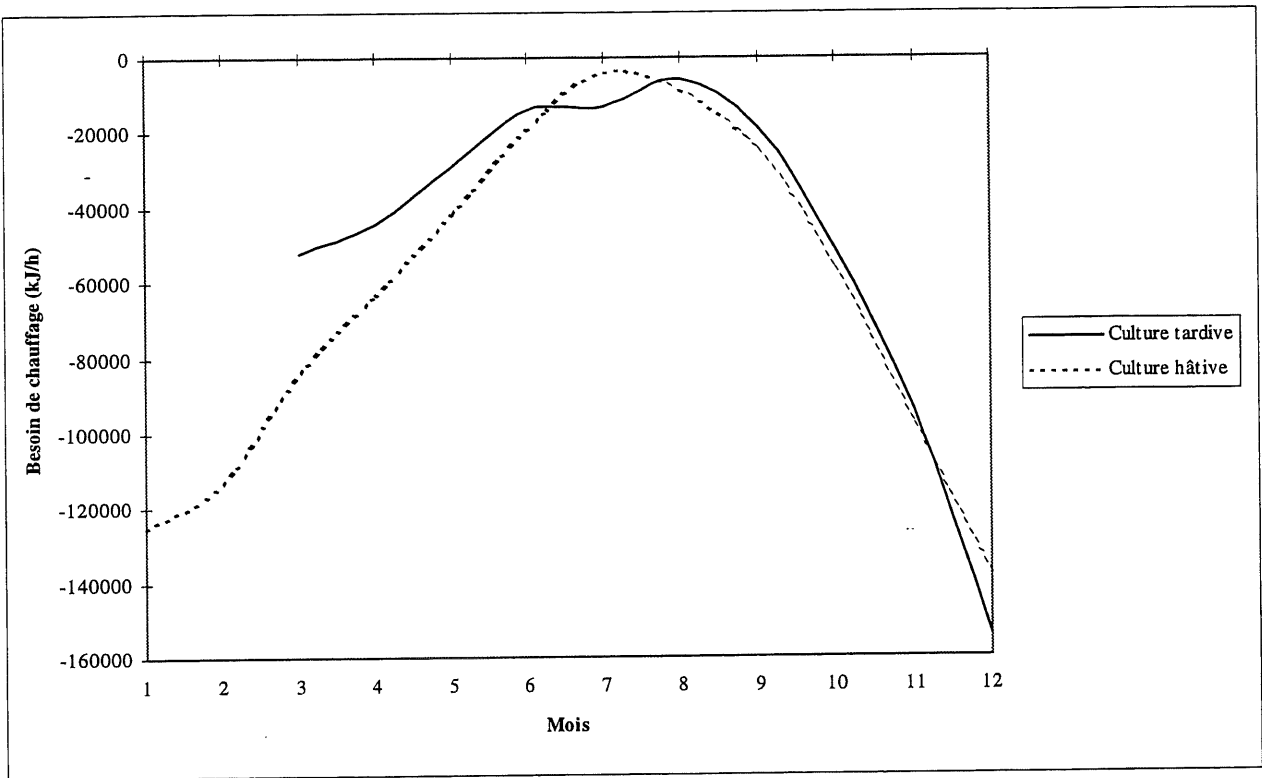


Figure C.5 Consommation énergétique selon le moment du début de la culture

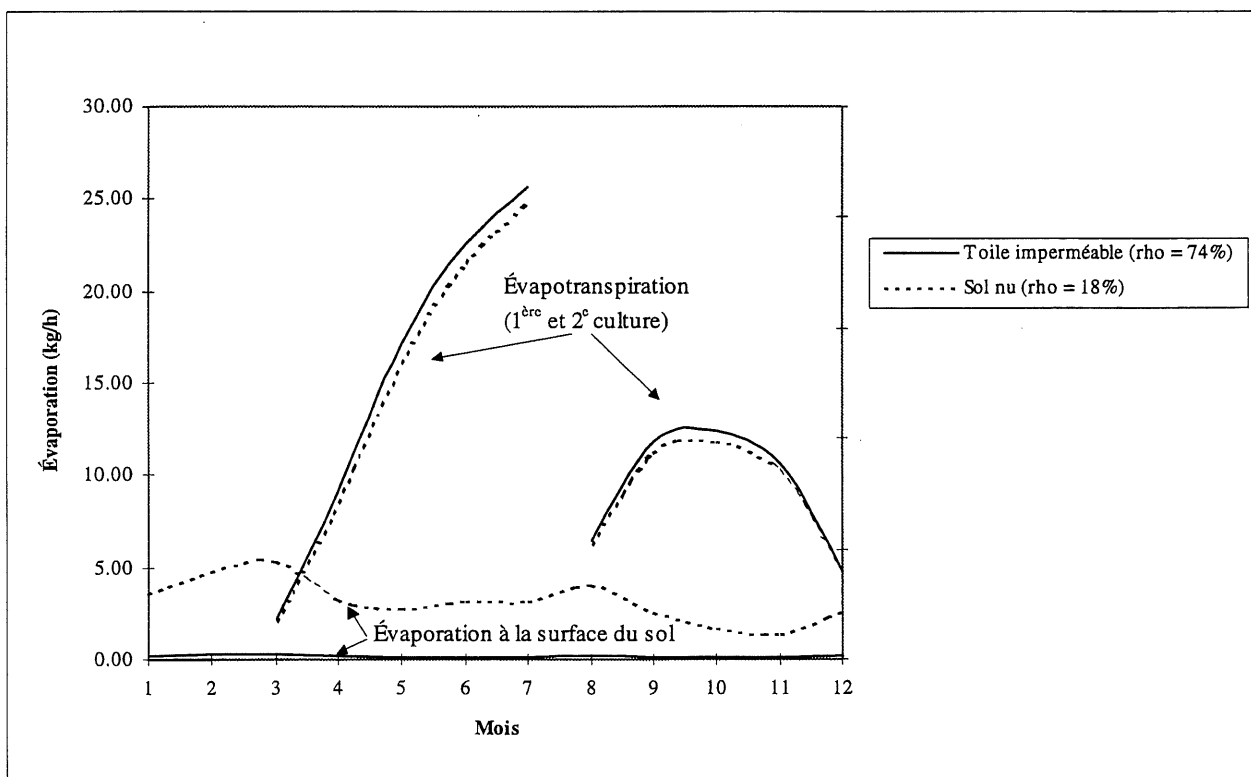
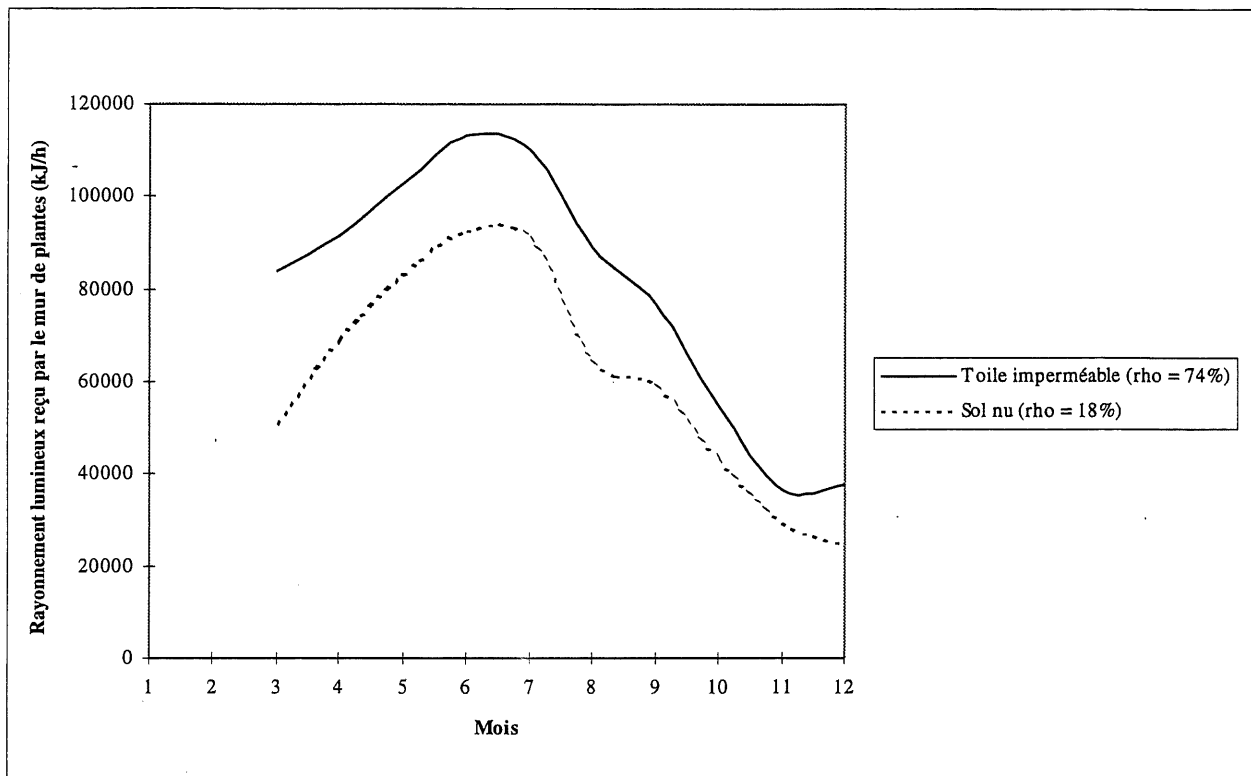


Figure C.6a Effets produits par la présence d'une toile blanche imperméable sur le sol (rho = coefficient de réflexion lumineux)

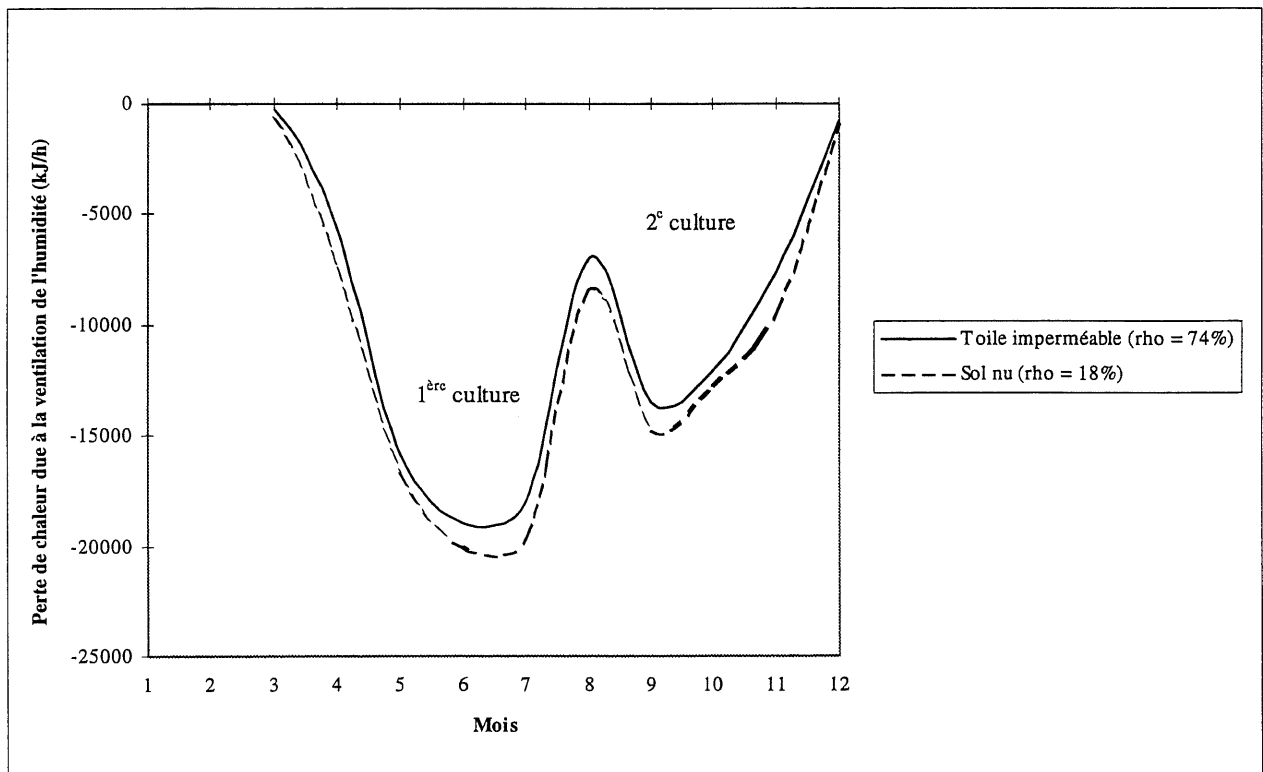
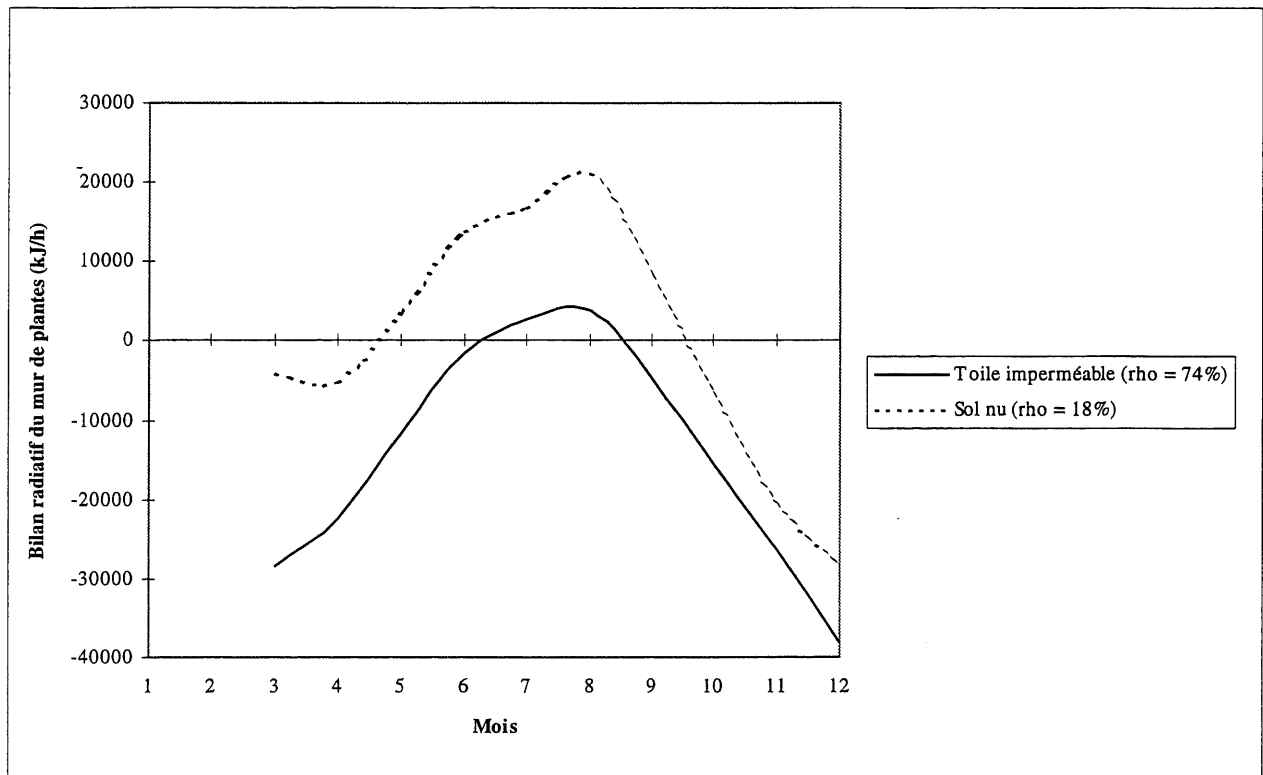


Figure C.6b Effets produits par la présence d'une toile blanche imperméable sur le sol

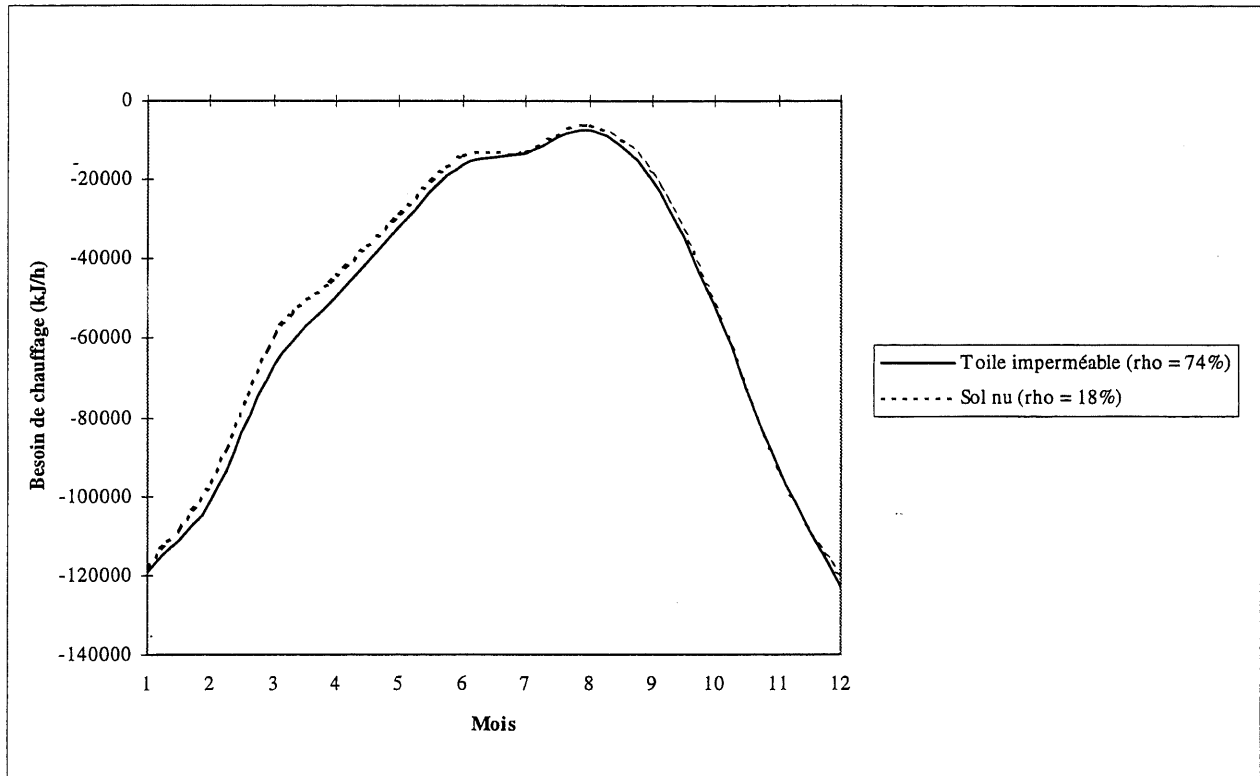


Figure C.6c Effets produits par la présence d'une toile blanche imperméable sur le sol

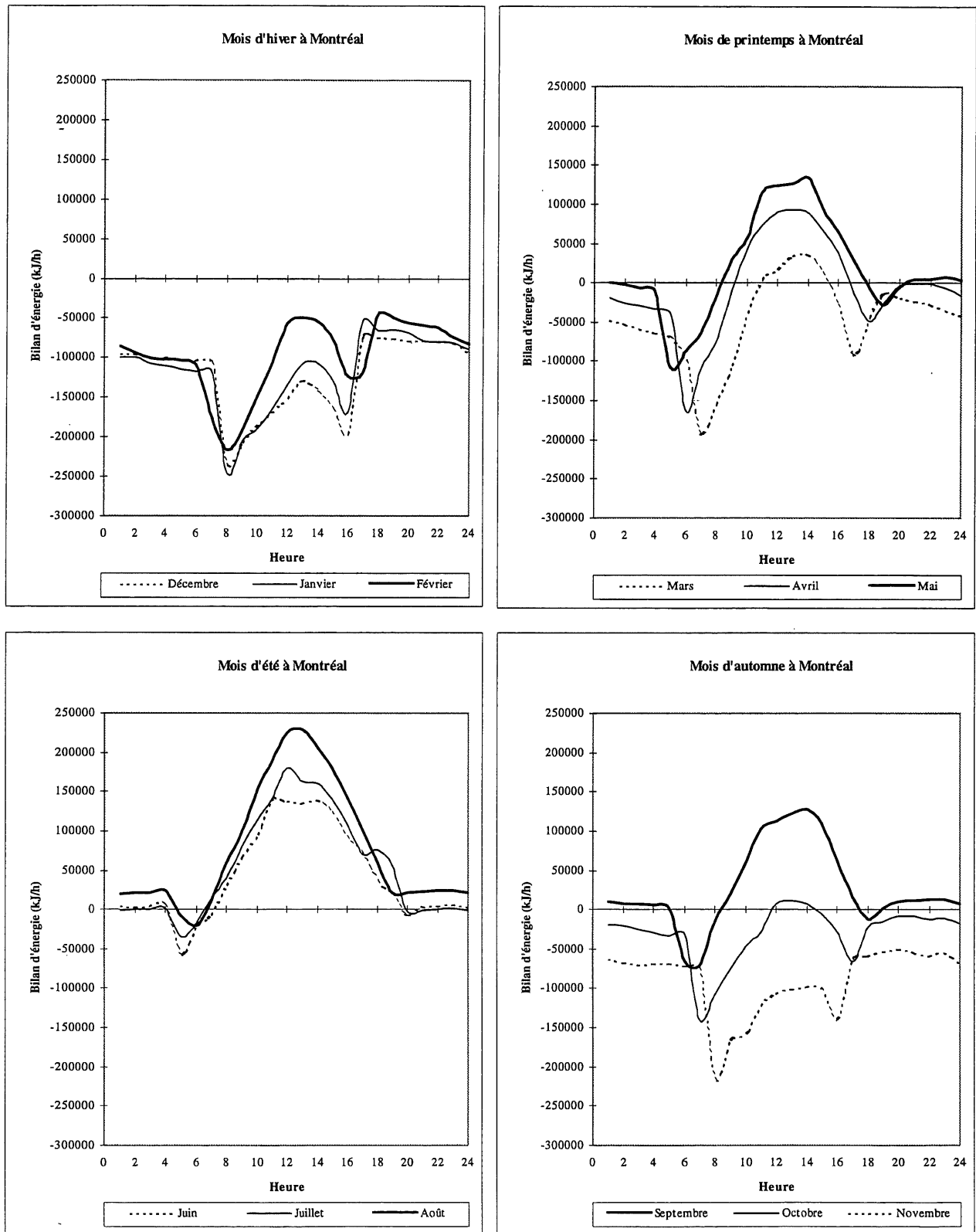


Figure C.7a Surplus de chaleur pouvant être stocké dans une serre standard à Montréal



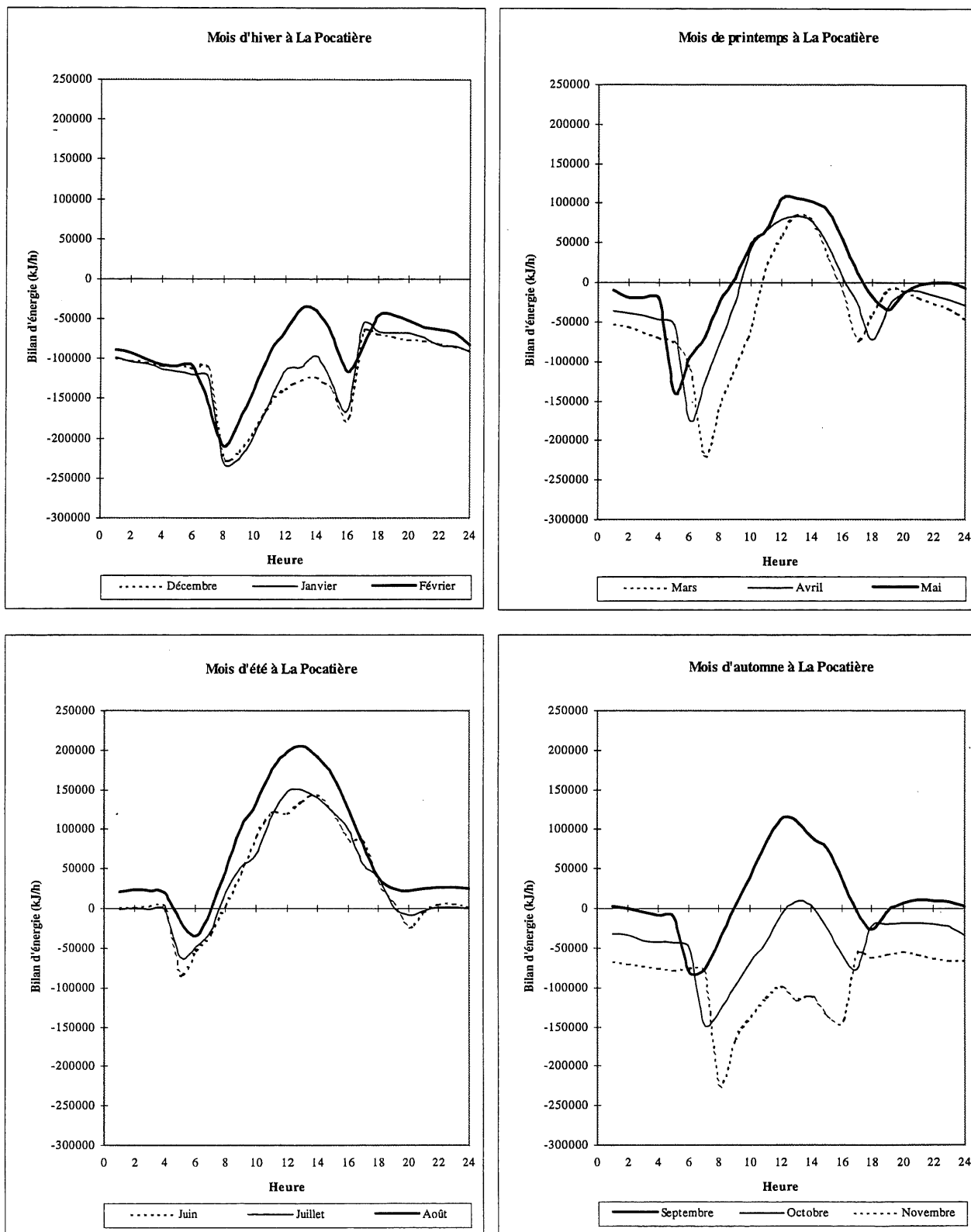


Figure C.7b Surplus de chaleur pouvant être stocké dans une serre standard à La Pocatière

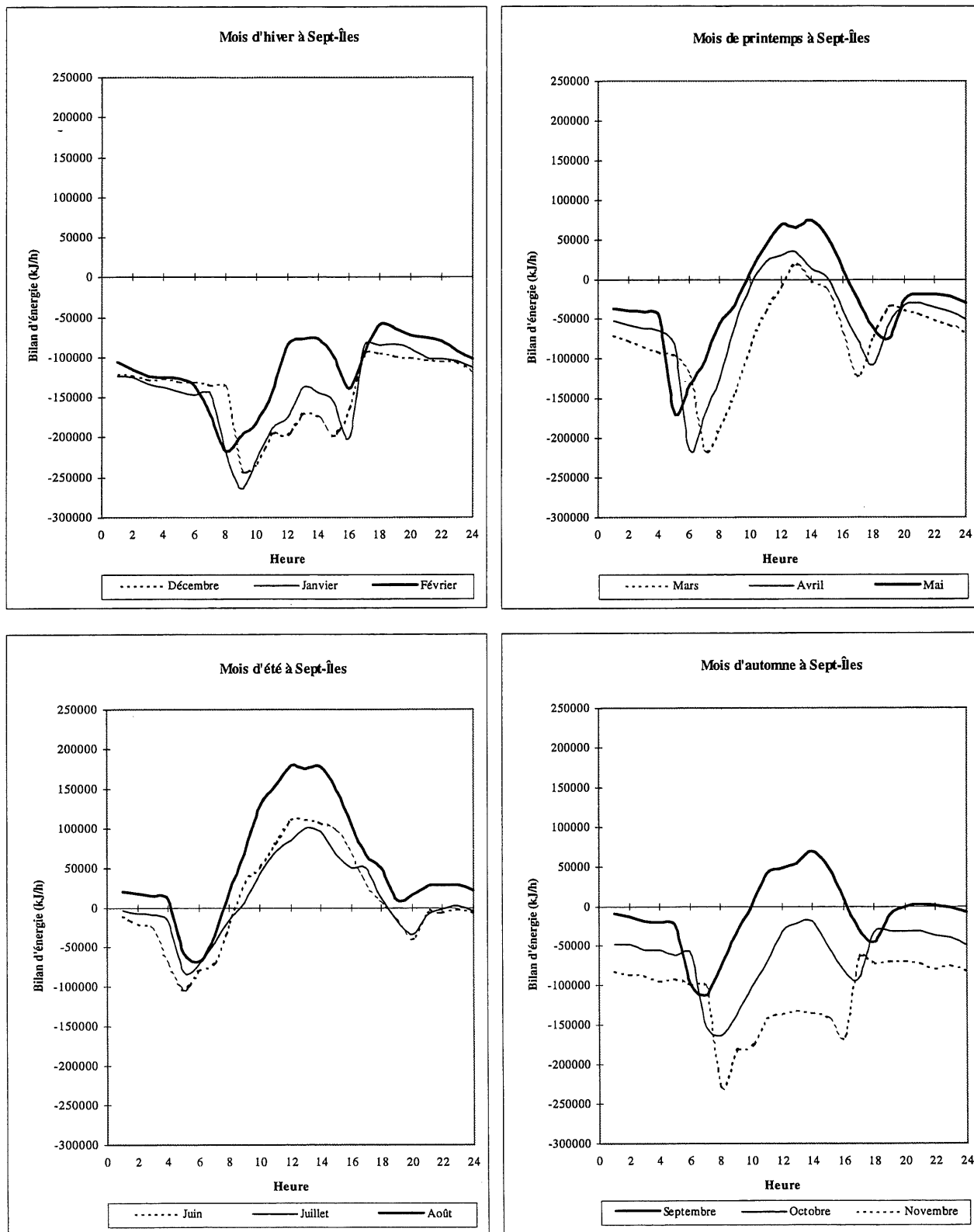


Figure C.7c Surplus de chaleur pouvant être stocké dans une serre standard à Sept-Îles

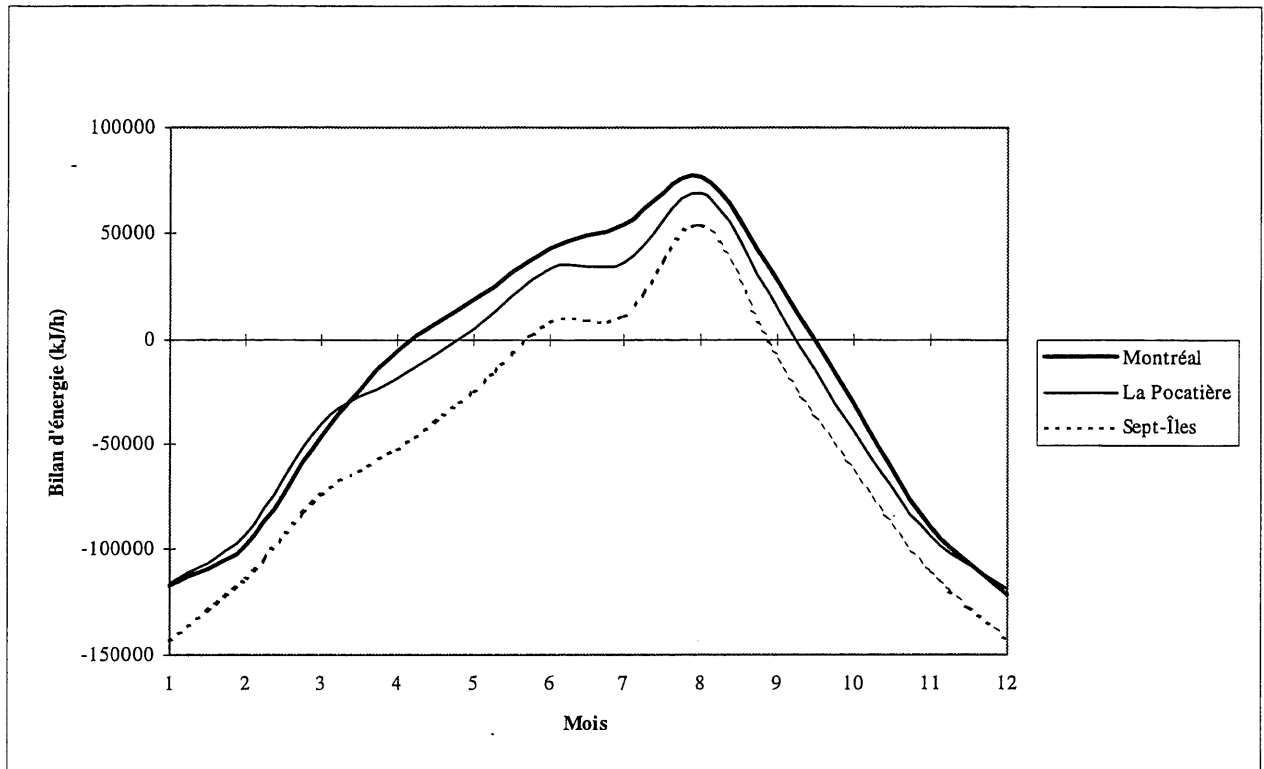


Figure C.7d Bilan énergétique pour chacun des 3 sites

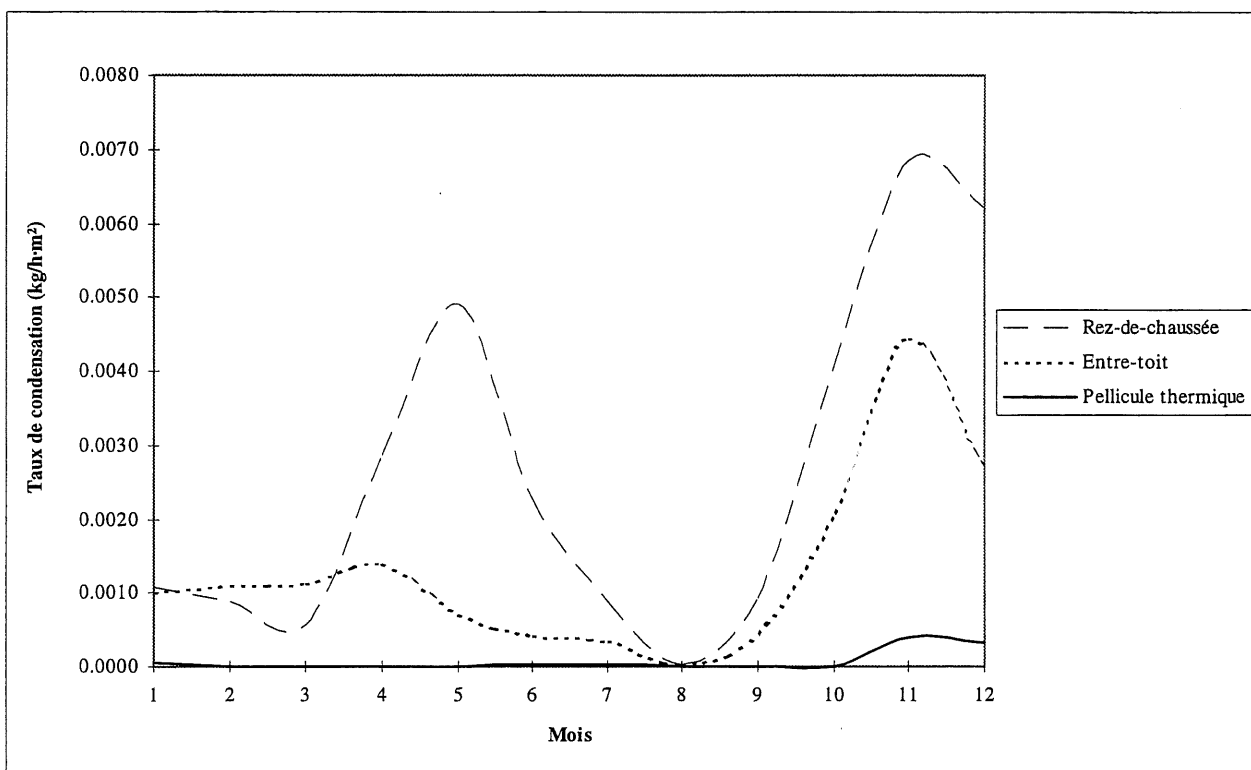
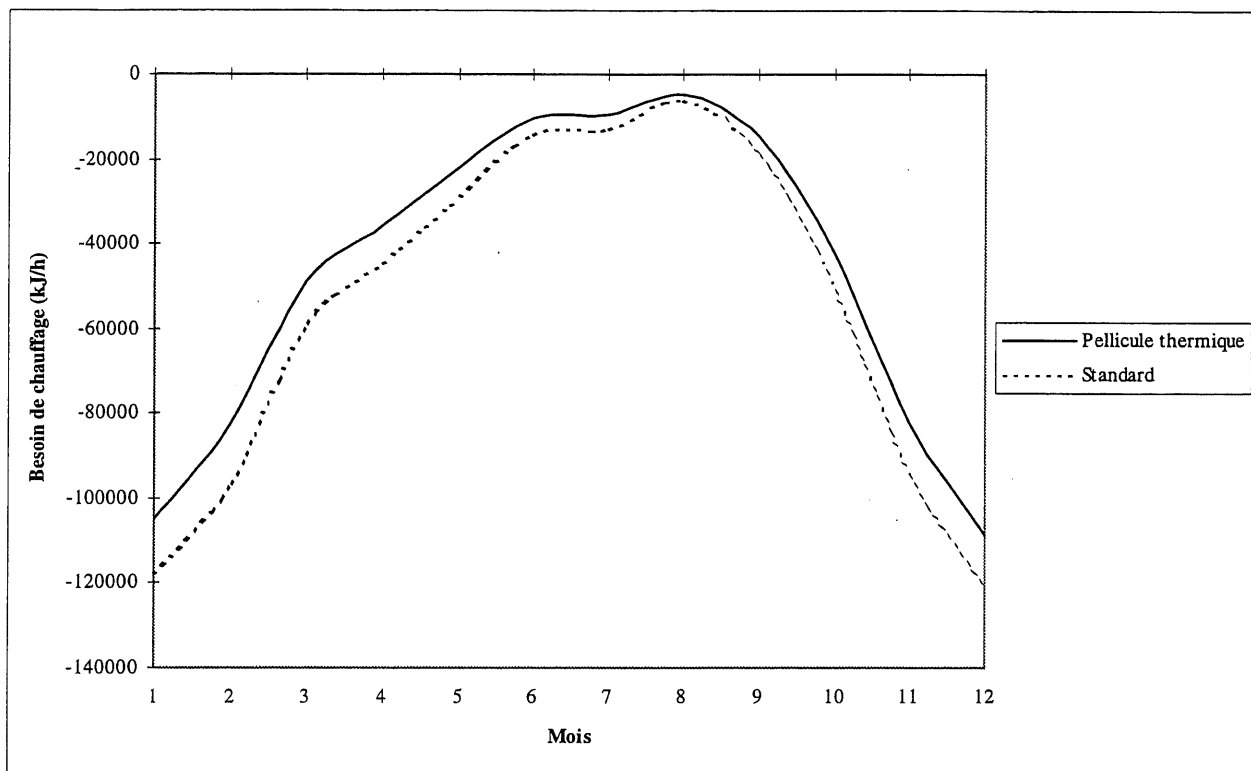


Figure C.8 Effets produits par la présence d'une pellicule thermique permanente

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] QUÉBEC, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction des études économiques, Service des analyses sectorielles, éd. (nov. 1992) *SITUATION DE L'INDUSTRIE SERRICOLE AU QUÉBEC*, Québec, 105 p.
- [2] LAROCHELLE, R., LESSARD, J.P., Québec, Ministère des Ressources naturelles du Québec, Bureau de l'efficacité énergétique (mars 1994) *DES TOMATES ET DES PLANTES MOINS «ÉNERGIVORES»*, La Maîtrise de l'énergie, p.18-19.
- [3] BERNIER, H. (1987) *ENERGY CONSERVATION USING A SOIL HEAT EXCHANGER-STORAGE SYSTEM IN A COMMERCIAL TYPE GREENHOUSE*, M.Sc. Thesis., Montréal, McGill University, 145 p.
- [4] BERNIER, H., RAGHAVAN, G.S.V., PARIS, J. (1991) *Evaluation of soil heat exchanger-storage system for a greenhouse. Part II: Energy saving aspects*, Canadian Agricultural Engineering, 33:000-000, p99-105.
- [5] ASAE ENGINEERING PRACTICE (1982) *Agricultural Engineers Yearbook, 1982-1983, Food, fiber and the future*, St-Joseph (Michigan), ASAE EP406, American Society of Agricultural Engineers.
- [6] LE COMITÉ DE RÉFÉRENCES ÉCONOMIQUES EN AGRICULTURE DU QUÉBEC: Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Société du crédit agricole Canada, Office du crédit agricole du Québec, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, l'Université Laval (septembre 1987) *Chauffage des serres - Consommation mensuelle de combustibles*, s.l., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 14 p.
- [7] CAOURIS, Y.G., KITTAS, C., SANTAMOURIS, M. (1989) *RÉGIONAL MONTHLY ESTIMATION OF GREENHOUSE ENERGY CONSUMPTION - APPLICATION TO GREECE*, Solar & Wind Technology, vol. 6, no. 3, p.225-233.
- [8] TAKAKURA, T., JORDAN, K.A., BOYD, L.L. (1971) *Dynamic Simulation of Plant Growth and Environment in the Greenhouse*, Transactions of the ASAE, vol. 14, no. 5, p. 964-971.
- [9] CHANDRA, P., ALBRIGHT, L.D., SCOTT, N.R. (1981) *A Time Dependent Analysis of Greenhouse Thermal Environment*, Transactions of the ASAE, vol. 24 , no. 2, p.442-449.

- 
- [10] ARINZE, E.A., SCHOENAU, G.J., BESANT, R.W. (1984) *A Dynamic Thermal Performance Simulation Model of an Energy Conserving Greenhouse With Thermal Storage*, Transactions of the ASAE, vol. 27, p.508-519.
- [11] DELWICHE, S.R., WILLITS, D.H. (September-October 1984) *The Effect of Condensation on Heat Transfer Through Polyethylene Film*, Transactions of the ASAE, vol. 27, p.1476-1482.
- [12] BERNIER, H. (s.d.) *CONSTRUCTION ET ÉQUIPEMENTS DE SERRES, NOTES DE COURS*, La Pocatière, Institut de technologie agro-alimentaire de La Pocatière, 10.8 p.
- [13] LES INDUSTRIES HARNOIS INC. (s.d.) *CATALOGUE HARNOIS*, St-Thomas (Joliette), 7<sup>e</sup> édition, s.éd., 120 p.
- [14] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC (1994) *SERRE, CONSTRUCTION ET AMÉNAGEMENT*, s.l., s.éd., 73 p.
- [15] EL-SHOBOKSHY, M.S., HUSSEIN, F.M. (sept.-oct. 1993) *PARTICULATE POLLUTION EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF GREENHOUSES*, Renewable Energy, vol. 3, n° 6/7, p.655-660.
- [16] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC: Comité des légumes de serre, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (18 février 1982) *RAPPORT de la journée d'information sur les légumes de serre*, s.l., s.éd., 148 p.
- [17] ALBRIGHT, L.D., SEGNER, I., MARSH, L.S., OKO, A. (1985) *In Situ Thermal Calibration of Unventilated Greenhouses*, The British Society for Research in Agricultural Engineering, s.l., n° 31, p. 265-281.
- [18] BOUDREAU, J.-M. Responsable du développement et du transfert technologique en cultures abritées (21 septembre 1994) *VISITE D'INFORMATION*, Institut de technologie agro-alimentaire de Saint-Hyacinthe.
- [19] POWER, K.C., MEYER, G.E., SCHULTE, D.D., FITZGERALD, J.B. (december 1989) *GRHEAT GREENHOUSE HEATING / COOLING ANALYSIS AND DESIGN MODEL*, ASAE, American Society of Agricultural Engineers, New Orleans, paper no. 89-7568, an ASAE meeting presentation, 26 p.
- [20] CANADA, Agriculture Canada (1987) *Les économies d'énergie dans les serres urbaines au Canada, construction et exploitation*, s.l., Normand Rousseau, 82 p.
- [21] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. (1984) *LÉGUMES DE SERRES, Culture*, Québec, s.éd., 156 p.

- 
- [22] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC: Comité de l'horticulture ornementale, atelier floriculture, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (1985) *FLEURS ANNUELLES ET LÉGUMES, Production de plants*, Québec, s.éd., 112 p.
- [23] ASHRAE, éd. (1993) *1993 ASHRAE HANDBOOK, FUNDAMENTALS, SI Edition*, Atlanta, 38 chapitres.
- [24] ARNOLD, E., PUTA, H. (1989) *OPTIMAL CONTROL OF GREENHOUSE CLIMATE FOR TOMATO PRODUCTION*, IFAC Large Scale Systems: Theory and Applications, Berlin, p.517-520.
- [25] CANADA, Atmospheric Environment Service (1982) *CANADIAN CLIMATE NORMALS, WIND, 1951-1980*, Volume 5, Ottawa, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada, 9 Volumes, 283 p.
- [26 a] CANADA, Atmospheric Environment Service (1984) *Principal Station Data MONT-JOLI*, Ottawa, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada.
- [26 b] CANADA, Atmospheric Environment Service (1983) *Principal Station Data MONTRÉAL INT'L A*, Ottawa, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada.
- [26 c] CANADA, Atmospheric Environment Service (1983) *Principal Station Data QUÉBEC A*, Ottawa, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada.
- [26 d] CANADA, Atmospheric Environment Service (1984) *Principal Station Data SEPT-ILES*, Ottawa, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada.
- [27] CANADA, Atmospheric Environment Service (1982) *CANADIAN CLIMATE NORMALS, TEMPÉRATURE, 1951-1980*, Ottawa, Volume 2, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada, 9 Volumes, 306 p.
- [28] KLEIN S.A. et al. (Septembre 1990) *ENGINEERING EXPERIMENT STATION REPORT 38-13, TRNSYS, A TRANSIENT SYSTEM SIMULATION PROGRAM*, Madison, version 13.1, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin--Madison, EX13-13 p.
- [29] KNIGHT, K.M., KLEIN, S.A, DUFFIE, J.A. (1991) *A Methodology for the Synthesis of Hourly Weather Data*, to be published in Solar Energy.
- [30] ASHRAE, éd. (1977) *ASHRAE HANDBOOK & PRODUCT DIRECTORY, 1977 FUNDAMENTALS*, New York, 37 chapitres.

- 
- [31] TAKAKURA, T., NISHINA, H., KURATA, K. (novembre 1982) *A SIMULATION ANALYSIS OF SOLAR GREENHOUSES WITH UNDERGROUND HEAT STORAGE UNITS*, Tokyo, Laboratory of Environmental Engineering, Department of Agricultural Engineering, University of Tokyo, 6 p.
- [32] AKRIDGE, J.M., POULOS, J.F.J (1982) *The Decremental Average Ground-Temperature Method for Predicting the Thermal Performance of Underground Walls*, ASHRAE Transaction, vol. 89 (2A), p.49-59.
- [33] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. (1991) *SOLAR ENGINEERING of THERMAL PROCESSES*, New York, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley-Interscience, 919 p.
- [34] CANADA, Atmospheric Environment Service (1984) *CANADIAN CLIMATE NORMALS, SOIL TEMPERATURE, LAKE EVAPORATION, DAYS WITH..., BLOWING SNOW, HAIL, FOG, SMOKE OR HAZE, FROST, 1951 - 1980*, Ottawa, Volume 9, Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada, 9 Volumes, 109 p.
- [35] THOMAS, M.K., CANADA, Atmospheric Environment Service (1975) *RECENT CLIMATIC FLUCTUATIONS IN CANADA*, Toronto, Climatological studies number 28, Environment Canada (available from Information Canada), 92 p.
- [36] ATHERTON, J.G., RUDICH, J. (1986) *THE TOMATO CROP, A scientific basis for improvement*, London, Chapman and Hall Ltd, 661 p.
- [37] LEOPOLD, A.C. (1964) *Plant Growth and Development*, New York, McGraw-Hill Book Company, 466 p.
- [38] PAPADAKIS, G., FRANGOUDAKIS, A., KYRITSIS, S. (April 1994) *Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfer between a Tomato Crop and the Greenhouse Environment*, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 57, n° 4, p. 217-227.
- [39] JONES, J.W., DAYAN, E., ALLEN, L.H., KEULEN, V.H., CHALLA, H. (March-April 1991) *A DYNAMIC TOMATO GROWTH AND YIELD MODEL (TOMGRO)*, Transactions of the ASAE, vol. 34, n° 2, p.663-672.
- [40] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec avec Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval (26 et 27 octobre 1984) *PERSPECTIVES D'AVENIR, CAHIER DE CONFÉRENCES, Symposium international sur la serriculture*, Québec, Université Laval, 425 p.
- [41] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC: Comité des légumes de serre, Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (7 décembre 1983) *RAPPORT, Journée d'information sur les légumes de serres*, s.l., s.éd., 181 p.



- 
- [42] LE COMITÉ DE RÉFÉRENCES ÉCONOMIQUES EN AGRICULTURE DU QUÉBEC: Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Société du crédit agricole Canada, Office du crédit agricole du Québec, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, l'Université Laval (septembre 1991) *Tomates en serres, Budgets avec et sans substrat*, s.l., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 6 p.
- [43] PAPADOPOULOS, A.P., ORMROD, D.P. (April 1990) *PLANT SPACING EFFECTS ON YIELD OF THE GREENHOUSE TOMATO*, Canadian Journal of Plant Science, vol. 70, p. 565-573.
- [44] STANGHELLINI, C. (1987) *TRANSPIRATION OF GREENHOUSE CROPS, an aid to climate management*, Wageningen, Institute of Agricultural Engineering (IMAG), 150 p.
- [45] INCROPERA F.P., DeWITT, D.P. (1990) *FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER*, New York, 3<sup>e</sup> édition, John Wiley & Sons, 919 p. plus Appendix et Index.
- [46] HASSON, A.M. (1990) *RADIATION COMPONENTS OVER BARE AND PLANTED SOILS IN A GREENHOUSE*, Solar Energy, vol. 44, n° 1, p.1-6.
- [47] YANG, X., SHORT, T.H, FOX, R.D., BAUERLE, W.L. (November-December 1989) *The Microclimate and Transpiration of a Greenhouse Cucumber Crop*, Transactions of the ASAE, vol. 32, n° 6, p.2143-2150.
- [48] KITTAS, C. (March 1990) *SOLAR RADIATION OF A GREENHOUSE AS A TOOL TO ITS IRRIGATION CONTROL*, International Journal of Energy Research, vol. 14, p.881-892.
- [49] CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC: Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval avec Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (6 juin 1985) *CAHIER DE CONFÉRENCES*, Journée d'information sur les cultures en serre, Sainte-Foy, Université Laval, 115 p.
- [50] STANGHELLINI, C. (1983c) *Forcing functions in greenhouse climate and their effect on transpiration of crops*, Wageningen, Institute of Agricultural Engineering (IMAG), 55 p.
- [51] HOLDER, R., COCKSHULL, K.E. (January 1990) *Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes*, Journal of Horticultural Science, vol. 65, p.31-39.
- [52] GARZOLI, K.V., BLACKWELL, J. (February 1987) *An Analysis of the Nocturnal Heat Loss from a Double Skin Plastic Greenhouse*, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 36, p.75-86.

- 
- [53] CHANDRA, P., WILLITS, D.H. (1974) *AN ANALYSIS TO PREDICT THERMAL BEHAVIOR OF A GREENHOUSE COLLECTION / STORAGE SYSTEM*, American Society of Agricultural Engineers (ASAE), N° 80-4025, p.1-20.
- [54] LASCANO, R.J., VAN BAVEL, C.H.M. (1986) *Simulation and Measurement of Evaporation from a Bare Soil*, Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 50, p.1127-1132.
- [55] PIETERS, J.G., DELTOUR, J.M., DEBRUYCKERE, M.J. (1994) *CONDENSATION AND STATIC HEAT TRANSFER THROUGH GREENHOUSE COVERS DURING NIGHT*, Transactions of the ASAE, vol. 37 (6), p.1965-1972.
- [56] SEGINER, I., KANTZ, D., PEIPER, U.M., LEVAV, N. (January 1988) *Transfer Coefficients of Several Polyethylene Greenhouse Covers*, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 39, p.19-37.
- [57] RYBAKOVA, L.E., BAIRAMOV, D.B., AMANOV, O.M. (1989) *THERMOISOPLETHS OF AIR IN A GREENHOUSE WITH MOISTURE CIRCULATION*, Applied Solar Energy, vo. 25, no. 2, p.67-71.
- [58] BAILLE, M., BAILLE, A., LAURY, J.C. (novembre 1994) *A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area*, Scientia Horticulturae, vol. 59, no. 3-4, p.217-232.
- [59] MILLETTE, J. (octobre 1993) *ÉTUDE NUMÉRIQUE D'UN ÉCHANGEUR THERMIQUE SOUTERRAIN-Mémoire de maîtrise*, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 120 p.
- [60] VELLY, J.-P. Centre de génie Industriel, laboratoire d'Énergétique et de Thermique Industrielle, Guidel-Plages, 56590 Guidel Cedex, France.